Elettronica e telecomunicazioni

Anno LVI
Numero 3
Dicembre 2007

Editoriale

Qualità percepita sugli schermi piatti in ambiente domestico

Ripetitori DVB-H domestici

La ripresa stereoscopica

Il Centro Ricerche all'IBC 2007

Edizione ottimizzata per la stampa.
La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LVI
N° 3
Dicembre 2007

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

Editoriale

ing. Gianfranco **Barbieri**
Direttore di
"Elettronica e
Telecomunicazioni"

Gli schermi piatti stanno ormai occupando una posizione dominante nel panorama multimediale. Sembra trascorso un secolo da quando sulle pagine di questa rivista cominciavano a comparire articoli in cui si ventilava una probabile evoluzione di quello che, dal punto di vista dell'utente, è il componente fondamentale della catena audiovisiva. Ripercorrendo le tappe che hanno scandito la nascita e lo sviluppo degli standard televisivi, si osserva come la scelta molti parametri sia stata fortemente condizionata dai limiti tecnologici dei trasduttori, rispettivamente quello ottico-elettrico (tubo da ripresa) e quello elettro-ottico (schermo). Negli anni '80 esplose la febbre della TV ad Alta definizione; le istanze di un comparto "consumer" sempre alla ricerca di nuovi sbocchi di mercato facevano leva sul salto tecnologico della componentistica che cominciava a trarre beneficio dalle ricadute delle ricerche spaziali. La spinta psicologica maggiore era tuttavia determinata dalla ottimistica previsione sulla disponibilità a breve termine di schermi piatti di grandi dimensioni. Le previsioni sulla tempistica, come si sa, vennero poi smentite dai fatti: ci volle una quindicina di anni per veder comparire sul mercato i primi costosissimi esemplari di grande schermo (allora basati esclusivamente sulla tecnologia "a plasma") i quali venivano visti con soggezione e diffidenza dalla grande utenza anche a causa della qualità d'immagine non sempre soddisfacente. Oggi tutto ciò è preistoria: i grandi schermi piatti rappresentano una percentuale rilevante di fatturato nel mercato dei prodotti consumer e tuttavia l'utente si trova spesso confuso di fronte alle opzioni che la proliferazione degli standard offre. In una serie di articoli precedenti si è cercato di fare chiarezza sul significato e sulle specifiche dei vari formati che affollano il mondo dei prodotti commerciali (SDTV, HD-Ready, Full-HD, Interallacciato, Progressivo, ecc…); nel presente numero viene affrontato un problema non secondario nel determinare la qualità delle immagini visualizzate sul grande schermo: la sua collocazione in ambiente domestico. L'articolo "Qualità percepita sugli schermi piatti in ambiente domestico" oltre ad esaminare l'influenza di alcuni fattori tradizionali (formato del segnale, distanza di visione, collocazione ambientale) introduce alcuni concetti che fanno parte del patrimonio esclusivo dei display digitali quali il "resizing" ed il deinterallacciamento.

Un’altra innovazione tecnologica a cui questa rivista ha dedicato spazio in tempi recenti è il sistema DVB-H che, come è noto, costituisce la variante della specifica DVB-T (standard per la TV digitale terrestre) per rendere quest’ultima adatta alla ricezione in mobilità su terminali portatili. Questi ultimi, sono per loro natura dotati di antenne a basso guadagno e pertanto rendono più critica la pianificazione della rete trasmittente la quale deve essere progettata col criterio di assicurare continuità di servizio senza peraltro aumentare arbitrariamente (per motivi di inquinamento elettromagnetico) la potenza irradiata dai siti principali. Per favorire la ricezione all’interno delle abitazioni è stata proposta l’adozione di un sistema basato su ripetitori domestici (denominati anche Gap-Filler) dispositivi di bassa potenza progettati per esseret installati autonomamente dall’utente finale all’interno della propria abitazione. Dal momento che questi dispositivi operano nella stessa banda delle normali trasmissioni televisive, è prioritario garantire che non insorgano interferenze che potrebbero disturbare la ricezione,nello stesso appartamento ed in quelli vicini. Un nuovo standard è attualmente in corso di preparazione presso il DVB e l’articolo “Ripetitori DVB-H domestici” ne descrive le linee guida, riassume i principali requisiti tecnici imposti ai ripetitori DVB-H domestici. e riporta i risultati di verifiche sperimentali sui primi prototipi, condotte in laboratorio e in un appartamento reale.

Proiettandoci un po’ più nel futuro troviamo un’applicazione al cui sviluppo si sta dedicando un numero crescente di Centri di Ricercai: la TV Stereoscopica. L’articolo “La ripresa stereoscopica” si inserisce nel filone di una serie di contributi, già pubblicati su questa rivista, nei quali sono state evidenziate le linee guida attorno alle quali si sviluppa la ricerca e le tematiche alle quali è necessario dedicare ancora approfondimenti e riflessioni. Uno dei problemi sui quali è concentrata la sperimentazione riguarda le tecniche di ripresa e l’articolo in oggetto apre un confronto, avvalendosi di dimostrazioni analitiche, su quale sia la configurazione geometrica ottimale tra le due prese attualmente in considerazione: quella con gli assi ottici convergenti e quella con gli assi paralleli. Viene contestualmente annunciata una campagna di prove di laboratorio i cui risultati saranno oggetto di un prossimo articolo.

Qualità percepita sugli schermi piatti in ambiente domestico

dr. Mario **Stroppiana**

Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Il miracolo della televisione (da il Radiorario - 1927, Teche Rai)

1. Introduzione

Su questa rivista sono già stati pubblicati parecchi articoli e schede tecniche relative ai display a schermo piatto, plasma (PDP), cristalli liquidi (LCD), proiettori e retro-proiettori [1,2]. Si è descritta la tecnologia alla base di tali display e la loro influenza sulla qualità dell'immagine rappresentata. Si è inoltre indicato che questi schermi, multi-formato e nativamente progressivi, visualizzano ottimamente immagini di buona qualità, ma rendono più visibili, amplificano, gli eventuali difetti già presenti sulle immagini, difetti causati da codifica PAL e/o da compressioni digitale a basso bit-rate [3, 4]. La loro risoluzione è normalmente superiore a quella dei tradizionali display SDTV a raggi catodici (CRT) consentendo così la visualizzazione di immagini ad Alta

Sommario
La televisione ad Alta Definizione (HDTV) è potenzialmente in grado di fornire a casa dell'utente immagini di qualità e risoluzione molto più elevate di quelle disponibili con la televisione a definizione standard (SDTV). La percezione di tali miglioramenti da parte dell'utente dipende però molto dalle condizioni di visione domestiche e dalle caratteristiche del display. In particolare, la percezione dell'aumento di risoluzione delle immagini è possibile solo se l'utente dispone di schermi sufficientemente grandi e li guarda da una distanza opportuna. Il significato di schermi sufficientemente grandi ed opportuna distanza di visione è analizzato ed indicato nell'articolo.

Definizione, purchè dotati di adeguate interfacce (HDMI) ed elettronica interna capace di gestire immagini HDTV. Per garantire il consumatore, sono apparsi sul mercato apparati etichettati con il logo "HD Ready" o "Full HD"[Nota 1], ad indicare la loro idoneità a gestire e visualizzare segnali HDTV.

Il marchio "HD-Ready" indica che lo schermo è provvisto di interfacce video digitali (HDMI/DVI) di collegamento al ricevitore digitale ed ha una risoluzione minima, nella modalità "wide aspect ratio", di 720 righe. Sono quindi etichettati "HD-Ready" schermi con risoluzioni 1024x720, 1280x768, 1366x768, ecc., inferiori alla risoluzione 1920x1080 del segnali HDTV 1080i/p.

Quando sono apparsi sul mercato schermi di risoluzione 1920x1080, questi sono stati etichettati anche "Full HD" per indicare che la loro risoluzione era uguale a quella supportata dal segnale HDTV 1080i/p.

2. Standard HDTV

L'ITU è l'organismo internazionale che ha il compito di definire gli standard mondiali per le telecomunicazioni (ITU-T) e per la trasmissione dei segnali e dei servizi televisivi (ITU-R). Con la Raccomandazione ITU-R BT. 601 tale organismo aveva definito, già negli anni '80 lo standard internazionale del segnale televisivo digitale a definizione standard. Tale standard prevede una diversa frequenza di quadro ed un diverso numero di righe d'immagine tra le aree americana e giapponese a 60 Hz e quella europea a 50 Hz [6].

Acronimi e sigle	
CIF	Common Image Format, 1920 pixel e 1080 righe
cph	cycles per picture height
cpw	cycles per picture width
CRT	Cathode Ray Tube
DVD	Digital Versatile Disc (www.dvdforum.org)
DVI	Digital Visual Interface (www.ddwg.org)
EICTA	European Information & Communications Technology Industry Association (www.eicta.org)
HDMI	High-Definition Multimedia Interface (www.hdmi.org)
HD-SDI	High Definition - Serial Digital Interface
HDTV	High Definition TeleVision
ITU	International Telecomminication Union (www.itu.org)
-T	- Standardisation Sector
-R	- Radiocommunication Sector
BT.	Broadcastig service Television
LCD	Liquid Crystal Display
MTF	Modulation Transfer Function
NHK	Nippon Hōsō Kyōkai (www.nhk.or.jp/englishtop)
PAL	Phase Alternate Line
PDP	Plasma Display Panel
SDTV	Standard Definition TeleVision
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers (www.smpte.org)

Nota 1 - Mentre HD Ready è un "logo" ufficiale dell'"EICTA", associazione fondata nel 1999 che raggruppa piccole e grandi aziende europee del settore "Information and Communication technology" e "Consumer Electronics", l'etichetta Full HD non è un logo ufficiale e non distingue tra sistemi a scansione progressiva ed interlacciata. L'EICTA ha quindi definito altri due "logo" ufficiali [5] per indicare che gli apparati così etichettati sono adatti per le immagini ad alta definizione secondo lo standard 1080p.

La Rac. ITU-R BT.709[Nota 2] definisce invece lo standard per l'HDTV [7]. E' divisa in 2 parti; la prima parte, definita anch'essa negli anni '80, specifica lo standard HDTV che, per l'area europea, consiste in un raddoppio delle risoluzioni, orizzontale e verticale, delle immagini rispetto a quelle definite dalla Rac. BT.601 per la televisione a definizione standard. In questo modo si mantengono, anche per l'HDTV due diversi formati d'immagine tra l'area americana-giapponese ed europea e, come nel caso della Rac. BT.601, l'elemento di immagine (*pel*) ha una forma rettangolare, diversa risoluzione nelle direzioni orizzontale e verticale dell'immagine.

Negli anni '90 si è estesa la Rac. BT.709 con una parte 2 in cui si definisce un unico formato d'immagine valido sia per l'area americana-giapponese a 60Hz che per l'area europea a 50 Hz[Nota 3]. Tale formato d'immagine è costituito da 1920 pixel e 1080 righe per la parte attiva dell'immagine e corrisponde ad un'uguale risoluzione dell'immagine lungo le direzioni orizzontali e verticali, formato CIF caratterizzato dal pixel quadrato. Infatti, le 1080 righe risultano date dal rapporto 9:16 (inverso del rapporto di forma) per 1920, numero di pixel per riga. Oggigiorno vengono utilizzati solo gli standard relativi alla parte 2 della raccomandazione.

Nota 2 - Per l'area europea si definiscono 1920 pixel attivi per riga e 1152 righe attive (1250 righe totali). I 1920 pixel equivalgono ad un raddoppio di risoluzione orizzontale rispetto all'SDTV (BT. 601) tenendo conto che si ha un cambiamento del rapporto di forma dell'immagine da 4:3 dell'SDTV a 16:9 dell'HDTV.
Nota 3 - Con l'indicazione 30/60 Hz sono inclusi anche i sistemi 29,97/59,94 Hz.

La Rac. BT.709 parte 2 definisce quindi vari formati HDTV, vedere tabella 1, che hanno però tutti in comune il formato d'immagine costituito da 1920x1080 pixel attivi. La differenziazione tra i formati della raccomandazione è solo data dalla frequenza temporale delle immagini (*frame rate*) e dal tipo di scansione che può essere interlacciato o progressivo. Come si può vedere dalla tabella 1, la raccomandazione prevede anche i formati progressivi a 25-30 Hz che hanno un flusso binario (bit-rate) uguale a quello interlacciato a 50 Hz ed i formati progressivi a 50-60Hz che costituiranno l'Alta Definizione futura. Il trasferimento seriale dei segnali 1080i a 50, 60Hz e 1080p a 24, 25, 30Hz non compressi è definito dalla Rac. ITU-R BT.1120 mediante l'interfaccia, denominata HD-SDI, che prevede una velocità di trasferimento di 1.485Gbps. Per il trasferimento seriale dei segnali 1080p 50, 60 Hz è invece necessaria un'interfaccia a 2.97 Gbps)definita anch'essa dalla Rac. ITU-R BT.1120 nella forma dual-link (2 interfacce HD-SDI a 1.485 Gbps con splitting dei bit seriali del 1080p) o single-link (1 sola interfaccia).

Tab. 1 - Formati HDTV previsti dalla Rac.ITU-R BT.709 Part 2.

Sistema	*Ripresa*	*Trasporto*
60/P	*60 progressiva*	*Progressivo*
30/P	*30 progressiva*	*Progressivo*
30/PsF	*30 progressiva*	*Quadro segmentato*
60/I	*30 interlacciata*	*Interlacciato*
50/P	*50 progressiva*	*Progressivo*
25/P	*25 progressiva*	*Progressivo*
25/PsF	*25 progressiva*	*Quadro segmentato*
50/I	*25 interlacciata*	*Interlacciato*
24/P	*24 progressiva*	*Progressivo*
24/PsF	*24 progressiva*	*Quadro segmentato*

Verso la fine degli anni '90 nasce inoltre lo standard 720p secondo cui cui l'immagine è costituita da 1280 pixel attivi per riga, 720 righe attive e scansione progressiva. La raccomandazione SMPTE 296/M prevede, a partire dal 2001, il 720p a 60/30 Hz, sistema americano, e 50/25 Hz, sistema europeo, mentre la raccomandazione ITU-R BT. 1543 prevede solo il 720p a 60/30 Hz.

Il trasferimento seriale del segnale 720p non compresso avviene con la stessa interfaccia HD-SDI a 1.485 Gbps definita dalla BT.1120.

3. Pre-elaborazione nei display a schermo piatto

I display a schermo piatto rappresentano le immagini in forma campionata su uno schermo a scansione progressiva e sono multi-standard nel senso che le immagini al loro ingresso vengono elaborate da circuiti di pre-elaborazione (*pre-processing*) in modo da adattarle al formato dello schermo (numero di pixel) di quel particolare display.

Il sistema di pre-processing effettua sulle immagini un operazione di ridimensionamento (*resizing*) e di de-interlacciamento se le immagini sono con scansione interlacciata. Per rappresentare l'immagine con un numero di campioni uguale al numero di pixel dello schermo viene eseguita un'interpolazione spaziale che equivale ad un ricampionamento dell'immagine. Se la frequenza di ricampionamento del display è superiore a quella dell'immagine, lo spettro in banda base dell'immagine non viene modificato e si distanziano tra loro gli spettri di ripetizione. Si aumenta cosi il margine di guardia, intervallo di frequenza senza contributi di segnale, tra lo spettro utile in banda base ed i suoi spettri di modulazione. Invece, nel caso opposto in cui la frequenza di ricampionamento del display è inferiore a quella originale dell'immagine, lo spettro utile dell'immagine deve essere ridotto mediante un'operazione di filtraggio passa-basso, riduzione della risoluzione del segnale, ed il margine di guardia tra spettro in banda base e spettri di ripetizione dell'immagine visualizzata sullo schermo dipende esclusivamente dalla caratteristica dei filtri interpolatori utilizzati nel display.

L'operazione di de-interlacciamento è invece necessaria per generare le righe mancanti sui semiquadri (*field*) delle immagini interlacciate. Per non dimezzare la risoluzione verticale delle immagini è necessario effettuare tale operazione mediante interpolatori vertico-temporali che utilizzano non solo i campioni immagine del semiquadro da ricostruire, ma anche quelli dei semiquadri precedente e/o successivo che sono relativi ad immagini generate in istanti temporali differenti. In questo modo si generano interferenze spazio-temporali che si cerca di mantenere a valori più piccoli possibile.

Le operazioni di resizing e di de-interlacciamento delle immagini sono la causa principale dell'amplificazione del rumore di codifica e di eventuali artefatti di codifica.

4. Qualità visiva percepita

La qualità d'immagine percepita a casa dell'utente dipende da molti fattori quali l'illuminazione dell'ambiente, la qualità tecnica e le caratteristiche del display, la risoluzione delle immagini, i degradamenti provocati dai sistemi di compressione usati nella catena trasmissiva o per la registrazione su DVD, le regolazioni cromatiche e di luminosità/contrasto del display, l'angolazione con cui si guarda lo schermo, le dimensioni dello schermo, la distanza dell'utente dallo schermo e, naturalmente, l'acuità visiva dell'utente stesso.

Volendo però considerare non gli aspetti generali della qualità, ma solo quelli della risoluzione percepita considerando un utente con acuità visiva media, i fattori principali da esaminare risultano la dimensione, risoluzione e modalità di visualizzazione dello schermo e la distanza di visione.

4.1 Rappresentazione delle immagini su schermi piatti

4.1.1 Visualizzazione delle immagini

Il segnale televisivo analogico è costituito da immagini rappresentate su un certo numero di righe, 625, di cui 576 considerate attive, nello standard SDTV europeo e 525, di cui 480 attive, nello standard SDTV americano. Le righe sono inoltre scandite in modo interlacciato nel senso che le singole immagini, denominate quadri (*frame*) che si ripetono con una frequenza tem-

porale di 25 Hz nello standard europeo e di 30 Hz in quello americano, sono suddivise in due semiquadri. Il termine analogico si riferisce al fatto che nella direzione orizzontale l'immagine è rappresenta in modo continuo e non a punti o campioni.

Sugli schermi a raggi catodici tali immagini sono visualizzate mantenendo la loro struttura di scansione, ossia sono visualizzate a righe mantenendo la suddivisione in quadri e semiquadri. Nella direzione orizzontale l'immagine è visualizzata in modo continuo, se si trascura, l'effetto della maschera introdotta negli schermi CRT a colori per selezionare il tipo di fosforo (Rosso, Verde, Blu) da eccitare.

La suddivisione e visualizzazione a righe ed ancor più la struttura interlacciata di scansione riducono il dettaglio percepibile lungo la direzione verticale dell'immagine (risoluzione verticale) e generano dei difetti (interferenze od artefatti).

Relativamente alla riduzione di risoluzione è stato quindi definito ed introdotto, già nei primi anni della televisione, un parametro denominato fattore di Kell il cui valore vale circa 0,65 sulle immagini a scansione interlacciata e circa 0,9 su immagini a scansione progressiva. Il fattore di Kell fornisce il valore di riduzione della risoluzione verticale rispetto a quella attesa in base al numero di righe dell'immagine.

Fig. 1 – Schematizzazione della catena "dalla generazione alla visualizzazione" nel caso di display a raggi catodici (CRT) ed a schermo piatto (LCD, PDP, ecc.). Gli schermi a raggi catodici (CRT) ricevono al loro ingresso un segnale analogico e, trascurando l'effetto della maschera, si può ritenere che questi visualizzino l'immagine in modo continuo nella direzione orizzontale dello schermo. Gli schermi piatti ricevono invece un segnale campionato, costituito da 1920x1080 o 1280x720 campioni immagine rispettivamente orizzontali e verticali, e devono convertire tali formati nel numero di pixel orizzontali e verticali dello schermo mediante un'operazione detta di interpolazione. Inoltre, benché nelle odierne telecamere a CCD o CMOS la digitilizzazione venga effettuata dal CCD/CMOS stesso, in figura è riportato il blocco A/D al fine di evidenziare l'effetto di tale operazione sullo spettro dell'immagine.

Il segnale televisivo digitale [6] mantiene la struttura a righe e quadri del segnale televisivo analogico, ma è inoltre campionato. Questo comporta che le relative immagini non sono più rappresentate in modo continuo nella direzione orizzontale, ma sono invece rappresentate da campioni (o punti) intervallati tra loro ad una distanza inversamente proporzionale alla frequenza di campionamento. La visualizzazione di tali immagini su schermi a raggi catodici che sono di tipo analogico avviene dopo aver convertito il segnale in analogico, mentre sugli schermi piatti, tipicamente digitali, sono visualizzati i campioni del segnale, vedere figura 1. Così facendo, con schermi a raggi catodici le operazioni di conversione digitale-analogico e relativo filtraggio sono effettuate elettronicamente a monte dello schermo mentre utilizzando schermi piatti per la visualizzazione delle immagini tali operazioni vengono effettuate dal trasduttore elettro-ottico dello schermo e dall'occhio. Quindi, con riferimento alla direzione orizzontale delle immagini, lo spettro del segnale visualizzato su schermi a raggi catodici consiste della sola componente in banda base mentre quello visualizzato su schermi piatti include anche tutti gli spettri di ripetizione (o modulazione) come indicato in figura 1. Tali spettri di ripetizione possono causare disturbi, aliasing, su immagini contenenti dettagli ad elevata risoluzione e quindi con componenti spettrali di alta frequenza.

4.1.2 Spettro delle immagini visualizzate

Innanzitutto definiamo cosa si intende per spettro d'immagine e come si rappresenta. Un'immagine, foto o quadro di un segnale televisivo, si estende su due dimensioni, larghezza ed altezza e viene visualizzata occupando tutto lo schermo. Dalla bidimensionalità dell'immagine ne discende che anche il suo spettro è definito in due dimensioni, larghezza ed altezza ed inoltre le unità di misura dello spettro devono essere scelte in modo da risultare invarianti rispetto alle dimensioni dello schermo.

Risulta quindi naturale rappresentare la frequenza orizzontale delle immagini in "cicli per larghezza di schermo (cpw)", che indica il numero di cicli o periodi di una sinusoide sulla larghezza dell'intero schermo, figura 2. Considerando la componente di luminanza la sinusoide indica la variazione periodica del livello di luminanza.

La frequenza verticale viene invece misurata in "cicli per altezza di schermo (cph)", e rappresenta il numero di cicli o periodi di una sinusoide sull'altezza dell'intero schermo.

In tale modo, rapportando il periodo della sinusoide alla lunghezza e larghezza dello schermo, si rende invariante il valore della frequenza rispetto alla dimensione dello schermo. Quanto indicato è illustrato in figura 2 nel caso di un'immagine costituita da righe verticali di luminanza, con

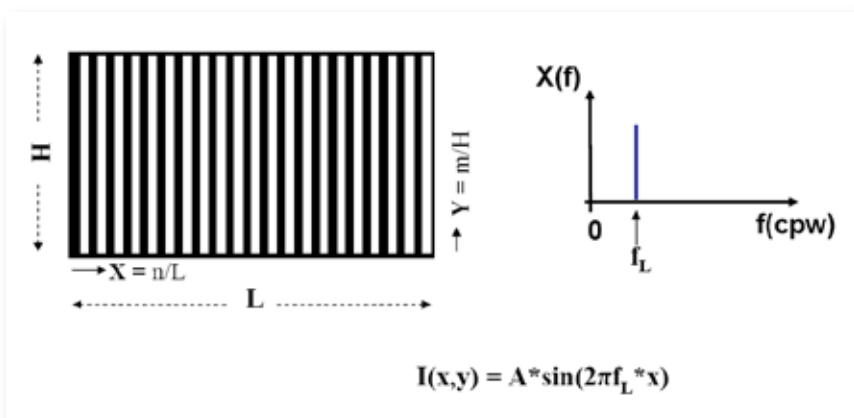



Figura 2 – Rappresentazione di un'immagine costituita da righe verticali di luminanza con andamento sinusoidale e rappresentazione del suo spettro costituito da una riga spettrale nella direzione orizzontale delle frequenze. In figura n indica il numero progressivo di pixel in orizzontale (da 1 ad L) ed m il numero progressivo di riga (da 1 ad H); x ed y indicano la posizione orizzontale e verticale del pixel rapportata al numero totale di pixel per riga (L) e di righe (H).

variazione sinusoidale del livello di luminanza lungo la direzione orizzontale.

Le frequenze massime rappresentabili sullo schermo dipendono dalla sua risoluzione e quindi dalla sua banda, nel caso di schermi analogici (schermi a raggi catodici), o dal suo numero di pixel nel caso di schermi digitali, ossia schermi piatti. La massima frequenza orizzontale/verticale teoricamente rappresentabile sullo schermo è uguale alla metà del numero di "pixel per riga"/"righe per quadro" (alternativamente un pixel/riga nero ed uno bianco; periodo della sinusoide uguale a 2 pixel/righe).

Consideriamo ora uno schermo piatto full HD con risoluzione 1920x1080, 1920 pixel per riga e 1080 righe. Tale schermo visualizza la forma campionata delle immagini e rende visibile lo spettro in banda-base e le sue ripetizioni attorno ai multipli della frequenza di ricampionamento che risulta pari a 1920 cpw lungo la direzione orizzontale e 1080 cph lungo quella verticale. In figura 3 sono indicati con pallino verde i centri dello spettro di banda base (0 cpw,0 cph) e del primo spettro di ripetizione nella direzione orizzontale (1920cpw, 0cph), verticale (0cpw, 1080cph) e diagonale (1920cpw; 1080cph).

Attorno a tali centri sono riportati i limiti teorici degli spettri degli spettri bidimensionali di immagini HDTV[Nota 4] 1080i/p[Nota 5] e 720p. Come si può vedere dalla figura, nel caso di immagini 1080i/p il limite teorico dello spettro in banda base confina con quello dei primi spettri di ripetizione. In tale modo non è possibile percepirlo senza alterazioni e completamente separato dagli spettri di modulazione, in quanto

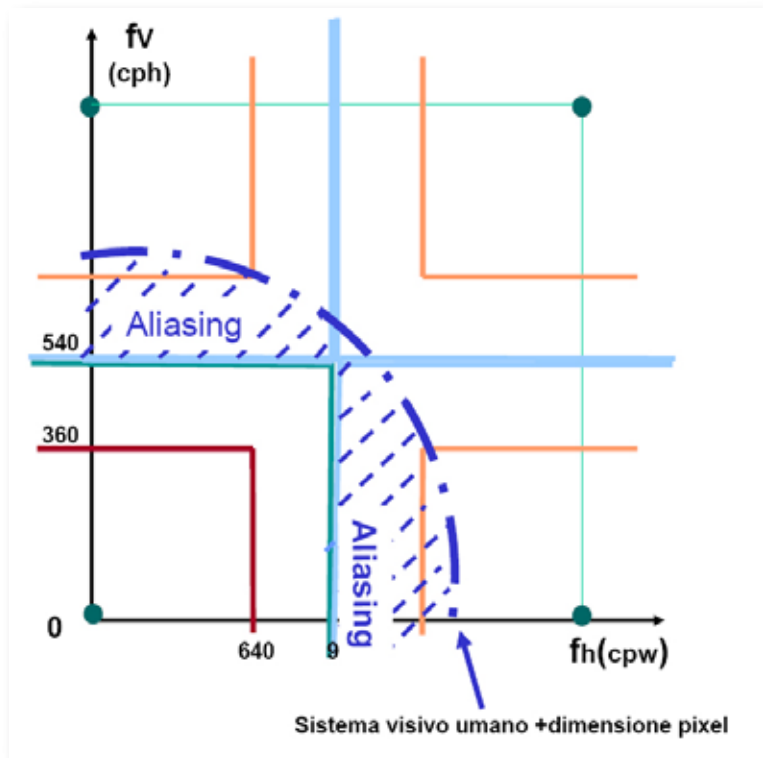



Fig. 3 – Visualizzazione su uno schermo piatto "Full HD", 1920x1080, di immagini HDTV di formato 1080i/p (linee verdi) e 720p (linee rosse). La figura riporta lo spettro in banda base dell'immagine ed il primo spettro di ripetizione nelle varie direzioni, ossia orizzontale, verticale e diagonale. In figura è anche schematizzata (curva blu) la caratteristica di filtraggio legata sia alle dimensioni non nulle dei pixel dello schermo che al sistema visivo umano in un'ipotetica condizione di visione.

Nota 4 - I limiti degli spettri indicati in figura possono essere approssimati nel caso di immagini di grafica elettronica, generate definendo il valore dei singoli pixel. Le immagini generate mediante ripresa elettronica sono filtrate, prima del loro campionamento, con filtri a livello fino a 0,4*fc dove fc indica la frequenza di campionamento del segnale HDTV ed ha valore pari a 74,25 MHz corrispondente a 768cpw per il 1080i/p e 512cpw per il 720p. Le Raccomandazioni ITU-R BT.709 e BT.1543 indicano inoltre che il filtro deve avere almeno 12 dB di attenuazione a metà della frequenza di campionamento, ossia a 37,125 MHz. Frequenze di valore tra 0,4 e 0,5 la frequenza di campionamento possono comunque essere presenti seppur attenuate.

Nota 5 - Sono considerate congiuntamente le immagini HDTV 1080i e 1080p in quanto l'articolo si focalizza sugli aspetti della percezione della risoluzione e quindi su immagini fisse, non si hanno differenze tra i due tipi di standard. Le differenze sono presenti solo quando si considerano immagini in movimento la cui analisi è però al di fuori dello scopo di questo articolo.

il filtraggio spettrale provocato dalla dimensione non nulla del pixel dello schermo e dalla caratteristica spettrale del sistema visivo umano (MTF) può essere grossolanamente schematizzato, per una determinata distanza di visione, con la curva di colore blu di figura 3; vedere Appendice per maggiori dettagli.

Una diversa condizione si ottiene visualizzando su uno schermo full HD immagini HDTV 720p. Infatti, come si può vedere in figura 3, in questo caso il limite teorico dello spettro in banda base del segnale è distanziato dagli spettri di ripetizione facilitando una sua pressoché corretta percezione da parte del sistema visivo.

4.1.3 Trasparenza nella percezione delle immagini

Riassumendo quanto indicato precedentemente, la percezione di un'immagine su display a schermo piatto avviene nel seguente modo:

1. sullo schermo sono visualizzati i campioni dell'immagine e quindi sono resi visibili gli spettri ripetuti (o spettri di modulazione) centrati sui multipli delle frequenze di ricampionamento del display,
2. la dimensione dei pixel rappresentanti i singoli campioni è non nulla, il che equivale ad un'operazione di filtraggio spaziale passa-basso delle immagini[Nota 6],
3. un'ulteriore operazione di filtraggio passa-basso, è effettuata dal sistema visivo umano la cui caratteristica dipende dal rapporto tra la distanza di visione e la dimensione dello schermo, vedere Appendice.

Il filtraggio delle immagini effettuato dal sistema visivo umano, indicato al punto 3, non è fisso ma dipende dalla distanza dallo schermo alla quale si posiziona l'utente per la visione delle immagini. Lo spettro percepibile dall'utente su schermi Full HD, ossia con risoluzione 1920x1080 può essere simile a quello indicato in figura 3, ossia si è in grado di percepire tutta l'area destinata allo spettro di banda base e parte dell'area relativa agli spettri di ripetizione. Immagini altamente dettagliate di segnali HDTV 1080i/p hanno uno spettro che ricopre pressochè tutta l'area destinata allo spettro di banda-base e di conseguenza quasi tutta quella relativa agli spettri di ripetizione. Le immagini percepite in queste condizioni risultano quindi affette da "aliasing", ossia interferite da porzioni degli spettri di ripetizione.

L'utente può però allontanarsi dallo schermo aumentando così l'operazione di filtraggio effettuata dal suo sistema visivo, vedere figura 4. In questo caso la percezione dell'immagine non è più affetta da "aliasing", ma l'immagine risulta meno definita in quanto parte del suo spettro utile risulta filtrato (attenuato) dalla caratteristica del sistema visivo posto in quelle condizioni di visione.

Risulta quindi che immagini HDTV 1080i/p non possono essere percepite in modo trasparente su schermi di risoluzione 1920x1080 in quanto, in dipendenza della distanza di visione, l'azione del sistema visivo umano è tale da far percepire interferenze di "aliasing" oppure limitare la risoluzione/definizione dell'immagine. Chiaramente, con schermi di risoluzione inferiore l'immagine viene digitalmente ricampionata (interpolata) a frequenza inferiore con conseguente limitazione del suo spettro e maggiore alterazione della qualità percepita.

Le immagini HDTV 720p hanno invece un estensione dello spettro minore dell'area di banda base dello schermo. Di conseguenza, anche i suoi spettri ripetuti hanno un'estensione inferio-

Nota 6 - Poiché l'immagine visualizzata è data dalla convoluzione tra l'immagine ricampionata dal display e la caratteristica spaziale del pixel, lo spettro dell'immagine visualizzata risulta uguale al prodotto tra gli spettri dell'immagine campionata e della forma spaziale del pixel. Lo spettro 2D del pixel risulta del tipo [sin(x)/x]*[sin(y)/y], con x proporzionale alla frequenza nella direzione orizzontale ed y a quella nella direzione verticale, e con gli zeri spettrali sui centri di ripetizione dell'immagine ricampionata.

re dell'area relativa agli spettri di modulazione. Questi risultano quindi separati tra loro da intervalli spettrali di guardia, liberi di contenuto spettrale. L'utente può quindi, entro certi limiti che saranno definiti successivamente, avvicinarsi allo schermo, figura 3, od allontanarsi, figura 4, percependo pressoché interamente lo spettro utile dell'immagine ma non gli spettri di ripetizione. Se ne conclude quindi che uno schermo full HD, risoluzione 1920x1080, è in grado di visualizzare le immagini 720p in modo molto più trasparente di quelle 1080i/p.

4.2 Distanza di Visione

4.2.1 Descrizione

Come accennato precedentemente, la caratteristica del sistema visivo umano dipende dal rapporto tra distanza del punto di visione dallaoschermo e la dimensione dello stesso, oltrechè naturalmente dall'acutezza visiva della singola persona. Nel seguito, al fine di limitare il numero di parametri da considerare, supporremo l'utenza costituita da persone con un'acutezza visiva media ossia in grado di percepire, al massimo, un dettaglio che si presenta sotto un angolo di visione di 1 primo, ossia 1/60 di grado.

La distanza del punto di visione dallo schermo è indicata in nH, dove H indica l'altezza dello schermo. La dimensione dello schermo è rappresentata dalla lunghezza della diagonale misurata in pollici. A parità di dimensioni (valore della diagonale) l'altezza dello schermo dipende dal suo fattore di forma, 4:3 oppure 16:9, come indicato in figura 5.

Le immagini HDTV hanno un fattore di forma 16.9, quindi faremo riferimento solo a schermi con fattore di forma 16:9. Inoltre, i pixel sono di forma quadrata, per cui le valutazioni potranno essere limitate alla sola direzione verticale, altezza dello schermo.

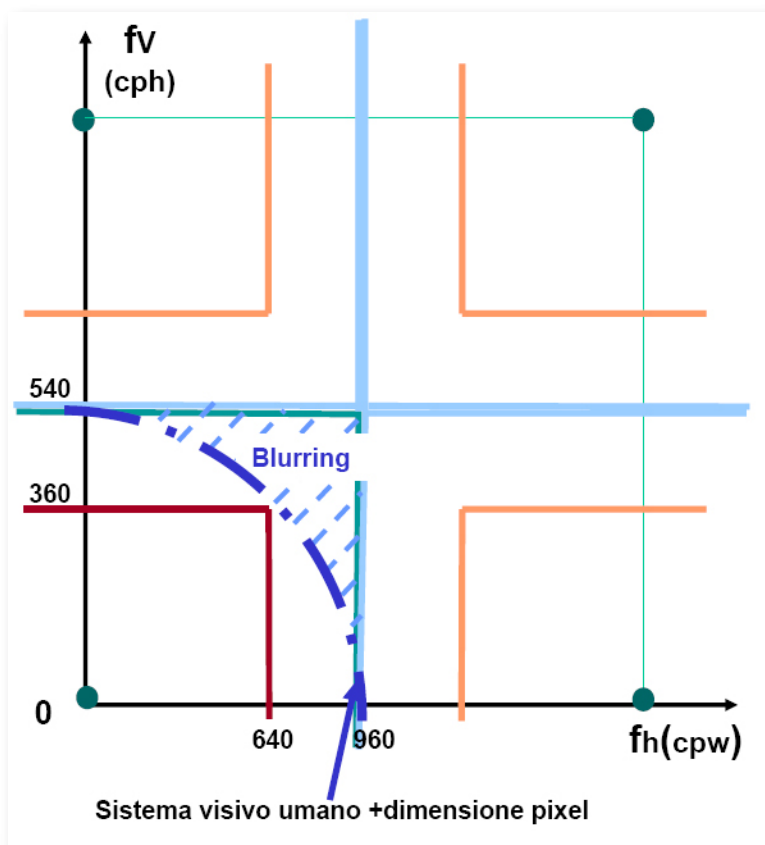



Fig. 4 – Visualizzazione su uno schermo piatto full HD, risoluzione 1920x1080, di immagini HDTV di formato 1080i/p (linee verdi) e 720p (linee rosse). La figura riporta i limiti dello spettro in banda base dell'immagine e del primo spettro di ripetizione nelle varie direzioni, ossia orizzontale, verticale e diagonale. La caratteristica di filtraggio del sistema visivo umano schematizzata in figura è relativa ad una distanza di visione, rapportata alla dimensione dello schermo, maggiore di quella indicata in figura 3.

Ad una distanza d da uno schermo di altezza H, si vedrà tutta l'altezza dell'immagine sotto un angolo dato da due volte l'arcotangente del rapporto tra l'altezza dello schermo e 2 volte la distanza di visione, come indicato in figura 6. Dividendo poi il valore dell'angolo α per il valore di acuità visiva, ossia 1 primo di grado (ricordando che i gradi sono divisi in 60 primi) si ottiene il valore della risoluzione verticale percepita indicata in numero di righe dell'immagine.

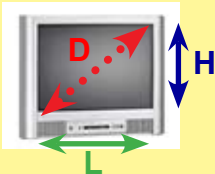
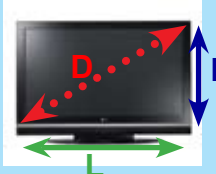
Nota 7 - Il grafico di figura 7 è riportato in una relazione presentata da Yukihiro Nishida (NHK, televisione pubblica giapponese) al gruppo tecnico B/TQE dell'UER.

Schermo 4:3				Schermo 16:9			
D		H	L	D		H	L
in	cm	cm	cm	in	cm	cm	cm
40	102	61	82	40	102	50	89
50	127	76	102	50	127	62	111
60	152	91	122	60	152	75	133

Fig. 5 – Dimensioni in cm degli schermi in formato 4:3 e 16:9 in funzione della diagonale espressa in pollici (*inch*).

Si ottengono in tal modo le curve riportate in figura 7 che indicano il valore di numero di righe percepite ad una determinata distanza e su schermi di una data dimensione[Nota 7]. Le rette rappresentano il luogo dei punti con una determinata risoluzione massima percepita. La risoluzione percepita nella direzione orizzontale si determina facilmente moltiplicando la risoluzione verticale percepita per 16/9, il fattore di forma, per esempio a 700 righe percepite in verticale corrispondono 700*(16/9) = 1244 punti percepiti in orizzontale.

Come si può vedere dalla figura 7, la risoluzione percepibile dall'occhio diminuisce all'aumentare della distanza di visione, mentre aumenta proporzionalmente con le dimensioni dello schermo.

Per maggiore comodità si riporta in Tabella 2 il valore della risoluzione verticale percepita, ricavabile dal grafico di figura 7, per schermi di 40", 50", 60" e per distanze da 2 a 3,5 metri. Nella tabella è inoltre indicato, tra parentesi,anche il valore della risoluzione percepita orizzontalmente.

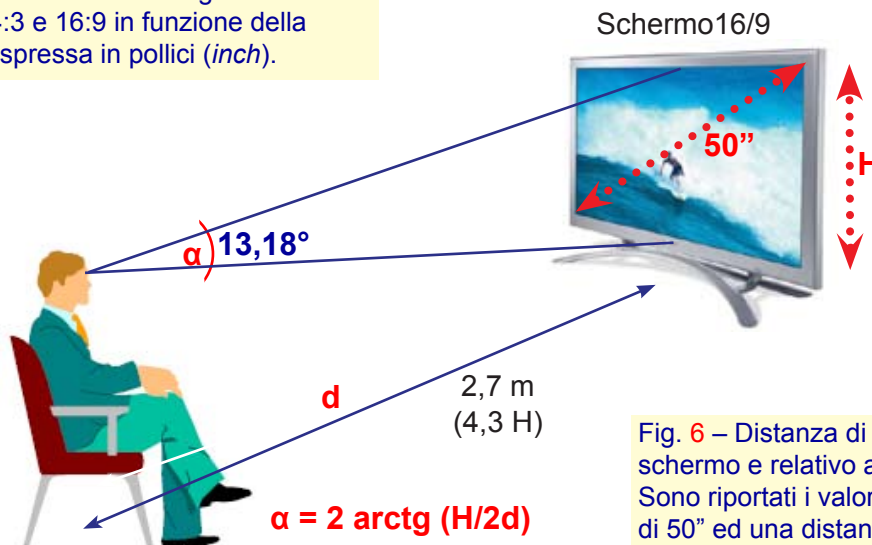



Fig. 6 – Distanza di visione dallo schermo e relativo angolo di visione. Sono riportati i valori per uno schermo di 50" ed una distanza di 2.7 m.

4.2.2 Risoluzione d'immagine percepibile in ambiente domestico

Come detto nel paragrafo precedente, si ricorda che il segnale 720p è costituito da immagini con risoluzione spaziale 1280x720 (1280 campioni per riga e 720 righe per quadro/immagine), mentre il segnale 1080i/p contiene immagini con risoluzione spaziale 1920x1080 (1920 campioni per riga e 1080 righe per quadro/immagine). Al fine di apprezzare completamente la risoluzione di queste immagini HDTV è allora necessario poter percepire un numero di punti spaziali almeno uguale a quello delle immagini di detti segnali HDTV.

La Tabella 2 riporta i valori della risoluzione spaziale percepita dal sistema visivo umano su schermi da 40", 50" e 60", che sono attualmente le dimensioni maggiori di schermi a Plasma ed LCD disponibili sul mercato consumer, e ad una distanza di visione dallo schermo tra i 2 ed i 3,5 metri. Sono state scelte nell'analisi queste distanze di visione poiché una distanza inferiore a 2 metri risulterebbe, da studi fatti dall'NHK (televisione pubblica giapponese), affaticante per lo spettatore, mentre una distanza superiore ai 3,5 metri richiede sale di visione più grandi di quelle normalmente disponibili a casa dell'utente[Nota 8].

Nota 8 - Uno studio è stato fatto dal Centro Ricerche RAI a metà degli anni 90 per individuare la distanza di visione preferita dall'utente [8].

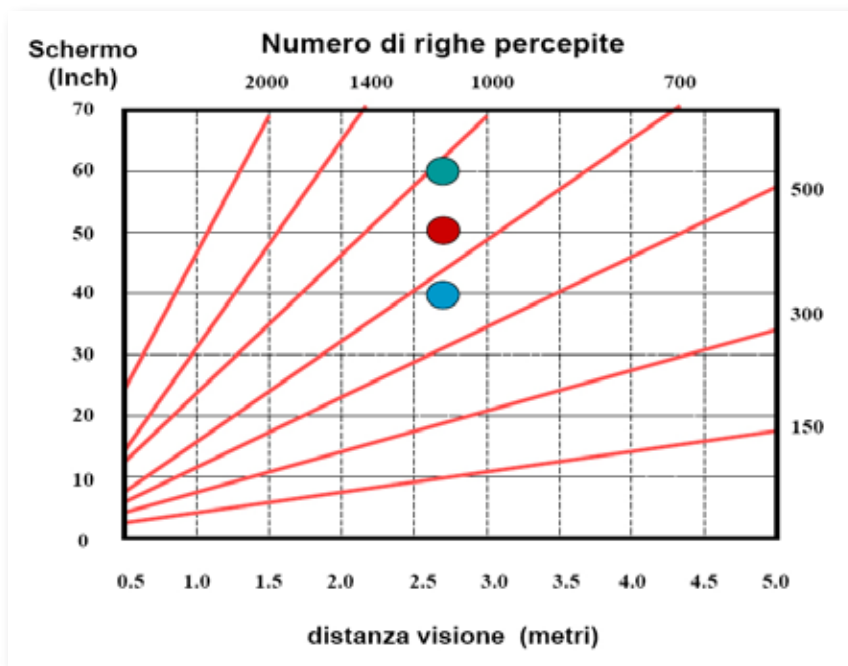



Fig. 8 – Curve di percezione della risoluzione di immagini 1080i/p e 720p in funzione della distanza di visione e della dimensione dello schermo.

Distanza di visione	Numero di righe (e pixel per riga) percepite su schermi da:		
metri	40"	50"	60"
2,0	855 (1520)	1061 (1886)	1270 (2258)
2,5	685 (1218)	851 (1513)	1020 (1813)
3,0	572 (1017)	711 (1264)	851 (1513)
3,5	490 (871)	610 (1084)	731 (1300)

Tab. 2 – Risoluzione espressa in numero di righe percepita su diverse dimensioni di schermo e varie distanze di visione. I valori tra parentesi si riferiscono al numero di pixel per riga percepiti.

Dai valori indicati in Tabella 2 e figura 8, risulta quindi che:

- ◊ su display da 40” non si è in grado di percepire la piena risoluzione disponibile con immagini 1080i/p, ad una distanza di almeno 2 metri,
- ◊ su schermi da 50” e con una distanza di visione di 2 metri si riesce a percepire completamente la risoluzione di immagini 1080i/p,
- ◊ la piena risoluzione di immagini 1080i/p può essere percepita con schermi da 60” ad una distanza di visione di quasi 2,5 metri,
- ◊ la risoluzione delle immagini HDTV 720p è pienamente percepita già con schermi da 40” ad una distanza di visione di poco inferiore a 2,5 metri, mentre con schermi da 50” ci si può posizionare ad una distanza di visione di circa 3 metri che diventa leggermente superiore a 3,5 metri con schermi da 60”.

Tali risultati indicano che un utente dotato di schermi da 40”, o di dimensione inferiore, difficilmente riuscirà ad apprezzare un aumento di risoluzione delle immagini 1080i/p rispetto a quelle 720p, mentre l’utente dotato di schermi da 50” inizia a percepire tale l’aumento quando si pone a distanze inferiori a 3 metri dallo schermo, ma deve arrivare a 2 metri dallo schermo per apprezzare completamente il guadagno di risoluzione.

Il totale apprezzamento della risoluzione di immagini 1080i/p sembra quindi possibile solo con schermi di almeno 50”, preferibilmente di 60”.

Le precedenti considerazioni sono sintetizzate in figura 8 che riporta le curve limite di completa percezione della risoluzione dei segnali HDTV 720p e 1080i/p in funzione della dimensione dello schermo e della distanza di visione.

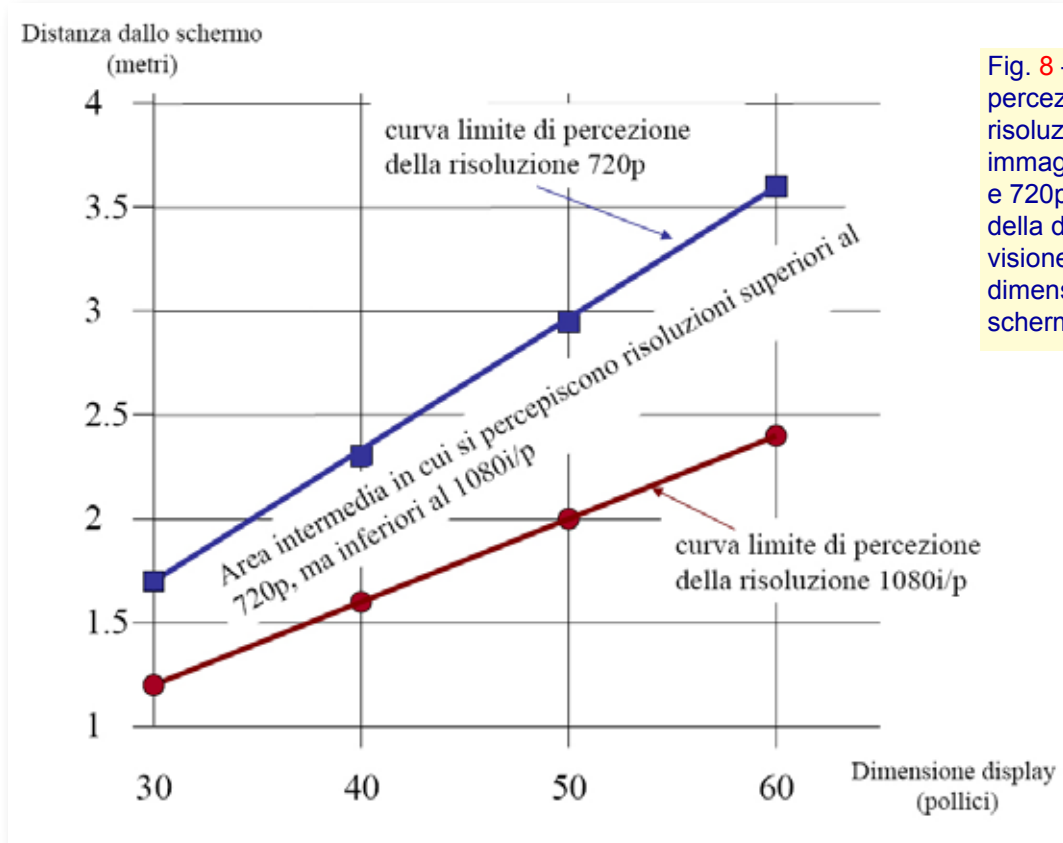



Fig. 8 – Curve di percezione della risoluzione di immagini 1080i/p e 720p in funzione della distanza di visione e della dimensione dello schermo.

5. Conclusioni

La qualità d'immagine percepibile a casa dell'utente dipende da molti fattori tipo: il formato del segnale, i degradamenti nella catena di trasmissione, la qualità e tecnologia del display utilizzato, l'ambiente e le condizioni di visione.

Di tutti questi si sono considerati solamente quelli che hanno impatto sulla risoluzione d'immagine percepibile a casa dell'utente e quindi: lo standard del segnale, la risoluzione e dimensione del display e la distanza di visione.

Non è stata fatta distinzione tra il segnale 1080i, scansione interlacciata, ed il 1080p, scansione progressiva, poiché il tipo di scansione non influenza la percezione della risoluzione sulle parti fisse dell'immagine, ma solo su quelle soggette a movimento, aspetto non considerato nell'articolo. E' comunque importante evidenziare che le immagini progressive sono visualizzate, in presenza di movimento, con una qualità maggiore di quelle interlacciate poiché le prime non necessitano di operazioni di de-interlacciamento che sono fonte di degradamenti, ed inoltre mantengono la stessa risoluzione spaziale sia sugli oggetti in movimento che su quelli fissi.

Per quanto riguarda quindi la percezione della risoluzione da parte dell'utente, con le ragionevoli ipotesi che la dimensione massima del display sia di 50" e che l'utente guardi la televisione a non meno di 2,5 metri dallo schermo si può concludere che tale utente è in grado di percepire appieno la risoluzione di immagini HDTV 720p, ma non completamente quella potenzialmente disponibile con immagini HDTV 1080i/p, come evidenziato in figura 8.

Inoltre, poiché la massima risoluzione dei display attualmente in commercio (display "Full HD") è di 1920x1080 pixel, lo schermo visualizza in modo pressoché trasparente le immagini HDTV 720p, ma non quelle 1080i/p con elevata risoluzione spaziale.

I display a schermo piatto etichettati "HD-ready" sono multiformato, ossia possono gestire e visualizzare segnali SDTV ed HDTV, sia 720p che 1080i/p. Questo consente al broadcaster di scegliere autonomamente il tipo di formato HDTV che considera più conveniente per la trasmissione dei suoi programmi. Il display a casa dell'utente automaticamente adatta, di volta in volta ed in modo trasparente per l'utente, il formato HDTV ricevuto alla risoluzione dello schermo, con la qualità percepibile d'immagine indicata precedentemente.

Da quanto esposto, emerge anche che la percezione di qualità e nitidezza delle immagini aumenta con le dimensioni dello schermo. Questo è senz'altro vero, almeno entro certi limiti, nel caso di visualizzazione di immagini HDTV di buona qualità, come supposto nell'articolo. Se ne dedurrebbe quindi che, compatibilmente con le considerazioni di costo, convenga acquistare display con dimensione dello schermo tale da garantire la completa percezione di risoluzione del formato HDTV a risoluzione maggiore, 1080i/p, e quindi orientarsi verso display prossimi ai 60" se non addirittura maggiori; nel caso di immagini 720p tali display potrebbero, al massimo, essere sovradimesionati.

Oggigiorno però la stragrande maggioranza dei programmi trasmessi in Italia sui canali analogici e digitali è in SDTV. I display a schermo molto grande che esaltano la qualità di immagini integre potrebbero amplificare eventuali degradamenti di codifica dell'attuale segnale SDTV ed evidenziarne la ridotta risoluzione, rispetto all'HDTV, delle immagini [3,4].

Un compromesso tra le esigenze attuali (SDTV) e quelle future (HDTV) potrebbe consistere in uno schermo di dimensioni non eccessive per i servizi attuali, ma in grado di far percepire, anche se non totalmente, il guadagno di risoluzione di futuri programmi HDTV trasmessi o riprodotti da HD-DVD o Blue-ray Disc.

Bibliografia

[1] G. Barbieri: "Schermi piatti: sviluppi e applicazioni" - Elettronica e telecomunicazioni, pp.3-9, n.3, dicembre 2000

[2] M. Barbero, N. Shpuza: "Display e proiettori, recenti progressi", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, agosto 2004

[3] M. Stroppiana: "I display a schermo piatto cambieranno il mondo televisivo?", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, agosto 2002

[4] M. Stroppiana, D. Wood: "L'avvento degli schermi a pannello piatto cambierà la trasmissione digitale (DVB)", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, agosto 2002

[5] M. Barbero, N. Shpuza: "Alta definizione: display 1080p", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, agosto 2007

[6] M. Barbero, N. Shpuza: "Le origini del video digitale (La raccomandazione ITU-R BT.601)", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, aprile 2003

[7] M. Barbero, N. Shpuza: "I Formati HDTV (Le Raccomandazioni ITU-R BT.709 e BT.1543)" - Elettronica e telecomunicazioni, n.1, aprile 2005

[8] M. Ardito, M. Gunetti, M.Visca: "Influence of Display Parameters on Perceived HDTV Quality" – IEEE Transactions on Consumer Electronics, pp. 145-155, Volume 42, Number 1, February 1996

Appendice

L'occhio umano percepisce più dettagliatamente oggetti vicini. Corrispondentmente, a parità di distanza dall'oggetto, percepisce meglio oggetti grandi rispetto ad oggetti piccoli.

Questo è conseguenza del fatto che l'occhio umano ha un grado di risoluzione, acutezza visiva, che dipende dall'ampiezza dell'angolo sotto cui vede un determinato particolare.

Un metodo di misura dell'acutezza visiva consiste nel determinare l'angolo sotto cui devono essere separati due tratti di un ottotipo per essere percepiti come distinti. Il valore minimo dell'angolo che corrisponde al limite di risoluzione del sistema visivo umano è pari a circa 1 primo di grado. In bibliografia [B1] sono riportati vari metodi di misura della acutezza visiva e la definizione di ottotipo.

Un'altra misura della risoluzione visiva, da cui è possibile determinare la risposta in frequenza del sistema visivo umano, consiste nella determinazione della soglia di percezione del contrasto che si misura facendo osservare, a varie distanze, reticoli sinusoidali con diversi livelli di contrasto.

Un metodo alternativo può essere quello di osservare dalla stessa distanza reticoli sinusoidali di diversa frequenza, ognuno dei quali con diversi valori di contrasto. Al variare della distanza di visione, o alternativamente della frequenza del reticolo, varia l'angolo sotto cui si vede un singolo periodo del reticolo sinusoidale. Si ottiene in tal modo la curva media di sensibilità al contrasto del sistema visivo umano, CSF - Contrast Sensitivity Function, riportata in figura A1, [B2, B3].

Come risulta evidente dalla figura A1, il sistema visivo umano si comporta come un filtro passa-basso, e quindi il sistema visivo può percepire l'immagine con una risoluzione inferiore di quella visualizzata sul display. L'entità di filtraggio e quindi della riduzione di risoluzione delle immagini percepite dipende naturalmente dalla distanza di visione dallo schermo.

In figura A2 sono riportate le curve di sensibilità dell'occhio in funzione della frequenza, normalizzata sulla dimensione dello schermo (cpw e cph), per alcune distanze di visione.

Come si vede dalla figura A2, l'entità di filtraggio del sistema visivo umano varia al variare della distanza di visione dallo schermo.

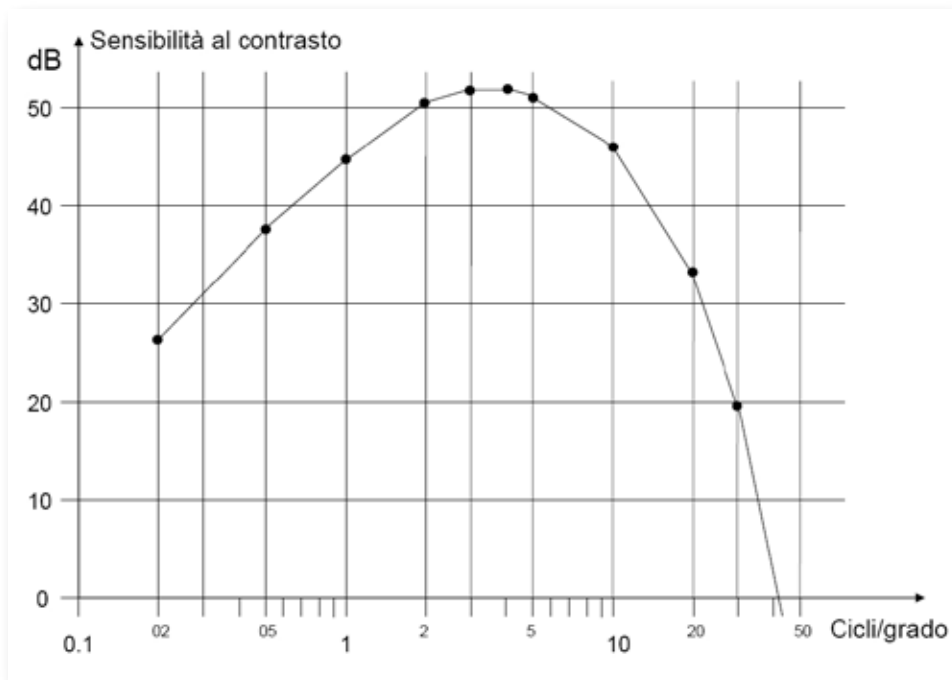



Fig. A1 – Curva di sensibilità al contrasto del sistema visivo umano (CSF - Contrast Sensitivity Function) in funzione del numero di cicli o periodi, sottostanti un angolo di visione di un grado.

Nel caso di immagini HDTV 1080p/i, la massima frequenza verticale rappresentabile sullo schermo full HD (1920x1080) è di 540 cph. Tale frequenza risulta attenuata dalla caratteristica del sistema visivo umano di circa 32 dB quando si guarda lo schermo a distanza 3,2 H, ma la sua attenuazione diventa superiore a 50 dB se ci si pone a 5H di distanza.

Con immagini HDTV 720p, la massima frequenza verticale è pari a 360 cph e risulta percepita con un'attenuazione di circa 32 dB quando ci si pone a 4,7H dallo schermo, distanza ben superiore a quella richiesta nel caso di immagini 1080i/p, per lo stesso valore di attenuazione.

Bibliografia

[B1] http://it.wikipedia.org/wiki/Acutezza_visiva

[B2] Claude Pons: "La risoluzione globale del cinescopio nella televisione ad Alta Definizione", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, 1992

[B3] Fergus W. Campbell: "The Human Eye a san Optical Filter", Proceedings of the IEEE, Vol. 56, No. 6, June 1968

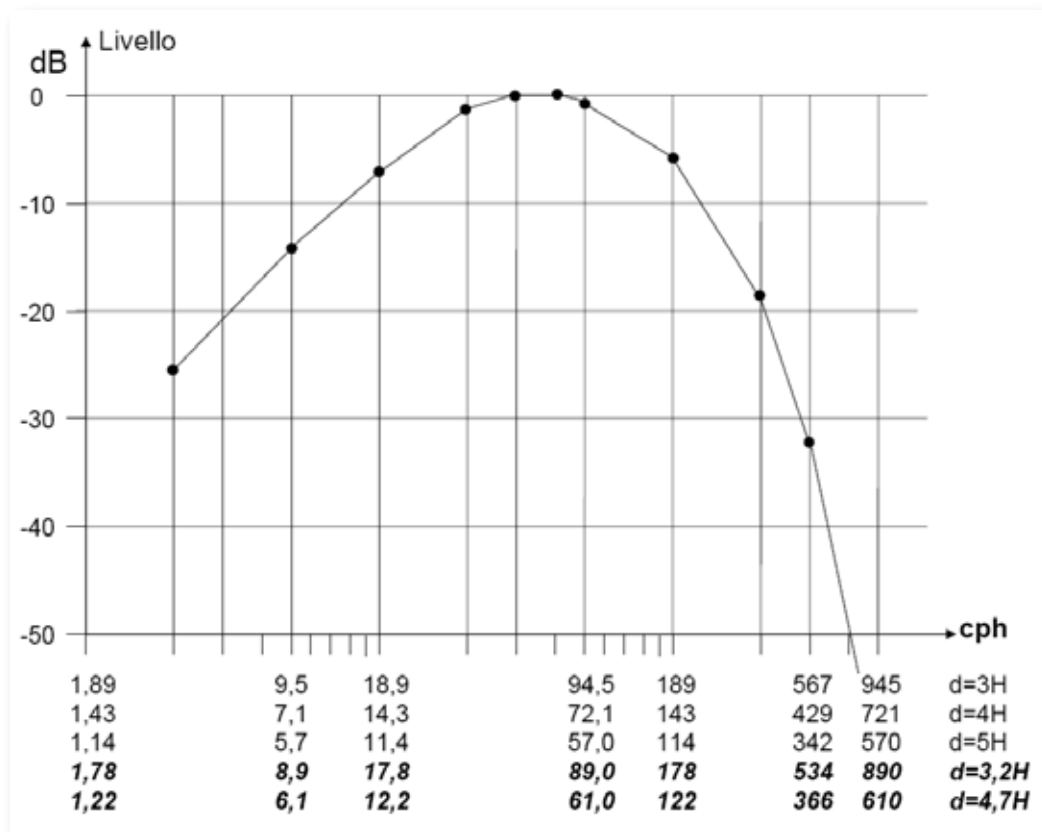
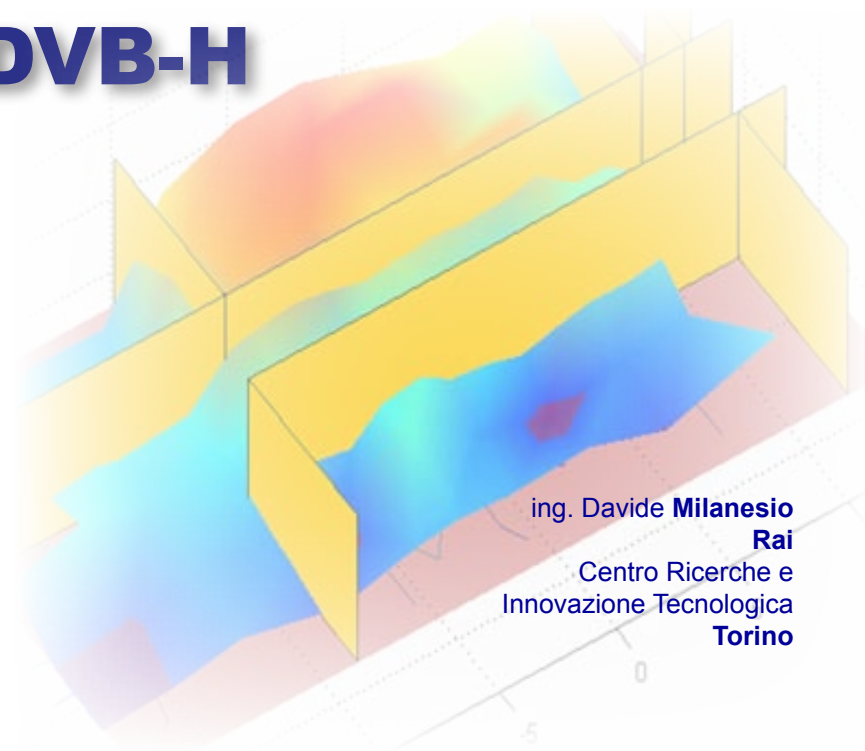



Fig. A2 – Funzione di trasferimento del sistema visivo umano a distanze di visione di 3H; 4H; 5H; 3,2H e 4,7H, dove H indica l'altezza dello schermo. Gli ultimi due valori di distanza di visione corrispondono alle distanze limite che consentono una percezione di tutta la risoluzione disponibile con immagini HDTV 1080i/p e 720p. Le frequenze sono indicate in cicli per altezza di schermo (cph); moltiplicando il valore per 16/9 si ottengono le frequenze orizzontali misurate in cpw.

Ripetitori DVB-H domestici

ing. Davide **Milanesio**
Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario
I ripetitori DVB-H domestici, noti anche come "Small Gap Filler", sono dispositivi di bassa potenza progettati per essere installati autonomamente dall'utente finale all'interno della propria abitazione, allo scopo di migliorare la copertura indoor del segnale DVB-H. Dal momento che questi dispositivi irradiano nella banda UHF, è prioritario garantire che non siano generate interferenze che potrebbero disturbare la ricezione, nello stesso appartamento e nel vicinato, dei normali programmi televisivi, analogici o digitali, distribuiti nella stessa banda. Per questa ragione, un nuovo standard è in corso di preparazione presso il DVB. L'articolo riassume i principali requisiti tecnici imposti ai ripetitori DVB-H domestici da questo standard e riporta i risultati di verifiche sperimentali sui primi prototipi, condotte in laboratorio e in un appartamento reale.

1. Introduzione

La ricezione di programmi televisivi su terminali mobili è oggi possibile grazie alla tecnologia DVB-H che, sfruttando una rete broadcast, permette di superare le problematiche, principalmente legate al costo della rete, insite nell'utilizzo di reti cellulari per la trasmissione di questi contenuti all'utente [1],[2].

I segnali DVB-H sono trasmessi nella stessa banda di frequenze (UHF) già utilizzata per la televisione digitale terrestre (DVB-T). Tuttavia, mentre le reti DVB-T possono essere pianificate per la ricezione mediante un'antenna posta sul tetto delle abitazioni, consentendo quindi potenze emesse più basse, la ricezione dei segnali DVB-H da parte di terminali portatili, dotati di antenna con basso guadagno, è richiesta anche al livello della strada e all'interno degli edifici, necessitando quindi di valori di campo elettromagnetico più elevati [3].

Sebbene il sistema DVB-H sia nato per offrire la ricezione anche in mobilità, numerosi studi sono concordi nell'affermare che un numero non trascurabile di utenti è fortemente interessato a fruire di questo servizio anche all'interno della propria abitazione, utilizzando il terminale DVB-H come TV personale, ad esempio in stanze dove un televisore non è disponibile [4],[5],[6].

Dal momento che, anche per ragioni di inquinamento elettromagnetico, non è possibile aumentare arbitrariamente la potenza irradiata dai siti trasmittenti principali, un modo per migliorare la copertura indoor in ambito cittadino consiste nell'integrare questi siti, già utilizzati per la diffusione di segnali televisivi convenzionali (analogici o digitali), con un certo numero di trasmettitori (oppure gap-filler) di bassa potenza, ad esempio utilizzando postazioni nella disponibilità degli operatori di telefonia mobile.

Tuttavia, come si è verificato nel corso di una sperimentazione effettuata a Torino con la collaborazione di Vodafone, la generazione di segnali DVB-H mediante piccoli trasmettitori installati su edifici residenziali potrebbe causare interferenze sui segnali televisivi tradizionali, ricevuti da impianti d'antenna posti nelle vicinanze, rendendo necessario adottare opportune contromisure valide caso per caso [7].

Nelle aree in cui non fosse possibile (o fosse poco conveniente dal punto di vista economico) garantire la completa copertura indoor anche ai piani più bassi degli edifici, sarà presto disponibile una soluzione alternativa, rappresentata dall'utilizzo di ripetitori DVB-H domestici, noti anche come "DVB-H Small Gap Filler", da collegarsi all'impianto centralizzato d'antenna già esistente allo scopo di migliorare la copertura all'interno del singolo appartamento. Si tratta di dispositivi "consumer" di bassa potenza, acquistati insieme al terminale DVB-H oppure separatamente, ed installati autonomamente dall'utente finale, senza l'ausilio di un tecnico specializzato. Potrà essere in questo modo garantita la copertura DVB-H indoor presso gli utenti interessati.

Acronimi e sigle

BER	Bit Error Rate
C/N	Carrier/Noise
DVB-H -T	Digital Video Broadcasting - Handheld - Terrestrial (www.dvb.org)
END	Equivalent Noise Degradation
ERP	Effective Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (www.etsi.org)
GSM	Global System for Mobile communications
MATV	Master Antenna TV
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SAW	Surface Acoustic Wave
SGF	Small Gap Filler
SNR	Signal to Noise Ratio
SFN	Single Frequency Network
STB	Set-Top-Box
UHF	Ultra High Frequency
VMS	Video Measurement Set
VSNR	Video Signal to Noise Ratio

2. Un nuovo standard per i ripetitori DVB-H domestici

I ripetitori DVB-H domestici sono dispositivi che irradiano nella banda UHF, per la quale è necessaria una licenza rilasciata dal Ministero delle Comunicazioni. Pertanto, in assenza di una specifica regolamentazione non sarebbe possibile installarli in abitazioni private.

Inoltre, uno standard che regolamenti questi ripetitori è necessario anche per evitare il rischio che vengano messi sul mercato dispositivi di bassa

qualità, che potrebbero causare interferenze sui segnali televisivi convenzionali (analogici o digitali) o su altri servizi (ad es. GSM), ricevuti nello stesso appartamento ma anche nel vicinato.

Per queste ragioni, nel 2007 il Technical Module (TM) del DVB ha assegnato ad una specifica Task Force del Gruppo TM-H (denominata SGFTF: Small Gap Fillers Task Force), coordinata da Rai, il compito di preparare una specifica tecnica che regolamenti i ripetitori DVB-H domestici, da sottoporre all'ETSI come proposta di Norma Europea (EN). La conclusione del lavoro della Task Force è previsto per il mese di gennaio 2008.

Fig. 1 – Utilizzo di un ripetitore DVB-H domestico per migliorare la copertura indoor.

2.1 Ambito di applicazione

I ripetitori DVB-H domestici possono essere utilizzati per migliorare la copertura indoor in aree in cui la copertura outdoor è disponibile. L'utente potrà collegare il proprio ripetitore alla presa TV già presente nell'appartamento, ricevendo il segnale dall'antenna sul tetto mediante un cavo diretto nel caso di un'abitazione privata singola oppure mediante l'impianto centralizzato d'antenna nel caso di un condominio (figura 1).

Ogni appartamento utilizza il proprio ripetitore. La copertura di interi edifici o di aree aperte con un singolo ripetitore domestico non è prevista: per questo tipo di applicazioni possono essere utilizzati gap filler tradizionali gestiti dall'operatore di rete.

L'obiettivo della nuova normativa è garantire un'adeguata copertura indoor in appartamenti di dimensione standard, fissata in circa 100 m^2 (la dimensione media delle abitazioni private in Italia è di 96 m^2 [Nota 1]), ma con vincoli molto stringenti al fine di non interferire con i servizi televisivi esistenti (TV analogica, TV digitale terrestre, TV via cavo) né con altri servizi.

Nota 1 - Dato relativo alle sole abitazioni di residenza (fonte: Istat 2001). La dimensione media scende a 92 m^2 includendo anche le seconde case.

La copertura effettiva dipenderà comunque da numerosi fattori, quali numero e consistenza delle pareti interne dell'appartamento, tipologia di arredamento, posizione, altezza e diagramma di irradiazione dell'antenna trasmittente del ripetitore, qualità e schema di modulazione del segnale DVB-H da ricevere, sensibilità del terminale (ad es. antenna integrata o telescopica), ecc. La copertura di aree più vaste (quali negozi, ecc.) è possibile con lo stesso dispositivo se il segnale d'ingresso ha qualità adeguata, non sono presenti pareti interne, e posizione e altezza dell'antenna trasmittente sono scelte con cura.

2.2 Schema funzionale del ripetitore

Un ripetitore DVB-H domestico è essenzialmente un amplificatore di canale, con lo scopo di incrementare il campo elettromagnetico di uno specifico segnale DVB-H nell'area di copertura designata.

È funzionalmente composto da due sezioni (figura 2):

◊ Una sezione di ripetizione del segnale (filtraggio di canale e amplificazione);

◊ Una sezione di monitoraggio della qualità del segnale, che utilizza un ricevitore DVB-H integrato per analizzare il segnale d'uscita. Questa sezione agisce su un meccanismo automatico di controllo della potenza, basato sulla misura della qualità del segnale, con il compito di imporre una opportuna riduzione della potenza d'uscita (o, se necessario, spegnimento del dispositivo) in caso di problemi, quali ad esempio segnale DVB-H di cattiva qualità, oscillazione, ecc. (si veda il paragrafo 2.6).

2.3 Massima potenza d'uscita

L'ERP massima, comprensiva del diagramma d'irradiazione dell'antenna trasmittente, è fissata in 1 mW (0 dBm).

Questo valore permette di ottenere la copertura desiderata, evitando allo stesso tempo di causare potenziali interferenze su altri servizi.

2.4 Risposta in frequenza

I ripetitori DVB-H domestici operano nella banda UHF, ritrasmettendo un singolo canale da 8 MHz sulla stessa frequenza da cui è ricevuto.

Al fine di minimizzare il rischio di interferenze sui canali adiacenti, è definita una maschera per la risposta in frequenza del dispositivo, come mostrato nella figura 3. La reirradiazione di altri segnali oltre al canale DVB-H potrebbe infatti generare repliche locali dei segnali relativi ai servizi televisivi tradizionali e causare potenziali intermodulazioni nei circuiti di amplificazione.

Fig. 2 – Schema a blocchi funzionale di un ripetitore DVB-H domestico.

Fig. 3 – Maschera della risposta in frequenza.

Questa maschera può essere soddisfatta mediante un filtraggio a frequenza intermedia che utilizzi due filtri SAW in cascata, a costi ragionevoli.

Potendo utilizzare lo stesso oscillatore locale per entrambe le conversioni di frequenza (in ingresso e in uscita), eventuali imprecisioni nelle conversioni vengono compensate, garantendo la massima precisione nella frequenza d'uscita e minimizzando il rumore di fase.

Il ritardo introdotto dalla sezione di filtraggio del segnale deve risultare inferiore a 2,8 μs, in modo da rappresentare soltanto una porzione dell'intervallo di guardia[Nota 2], per-

Nota 2 - 2,8 μs rappresentano l'1,25% dell'intervallo di guardia per modo 8k 1/4, il 40% per 2k 1/32.

mettendo quindi un corretto funzionamento in reti SFN. Questo valore è rispettato nel caso di due filtri SAW.

2.5 Requisiti della fase di installazione

I ripetitori DVB-H domestici sono pensati per essere installati autonomamente dall'utente stesso, senza bisogno dell'intervento di un tecnico specializzato.

Pertanto, il dispositivo deve prevedere una procedura automatica e a prova di errori per l'acquisizione, alla prima accensione, del multiplex DVB-H desiderato. Questa procedura dipenderà dalla specifica implementazione, e potrà avvalersi di una scansione completa in frequenza (con possibilità per l'utente di selezionare il canale desiderato), di liste precaricate di canali suggeriti, ecc. Un possibile algoritmo è riportato nella figura 4. L'ultima frequenza acquisita potrà essere salvata in una memoria non volatile per velocizzare le future riattivazioni del dispositivo.

2.6 Meccanismo di controllo automatico della potenza emessa

Per evitare il rischio di irradiare localmente un segnale di cattiva qualità, a causa della presenza in ingresso di un segnale già degradato, di condizioni di auto-oscillazione dovute a insufficiente schermatura dei componenti dell'impianto di distribuzione domestica o di malfunzionamento del dispositivo stesso, i ripetitori DVB-H implementeranno un adeguato meccanismo di controllo automatico della potenza emessa, riducendo quando necessario il livello d'uscita e

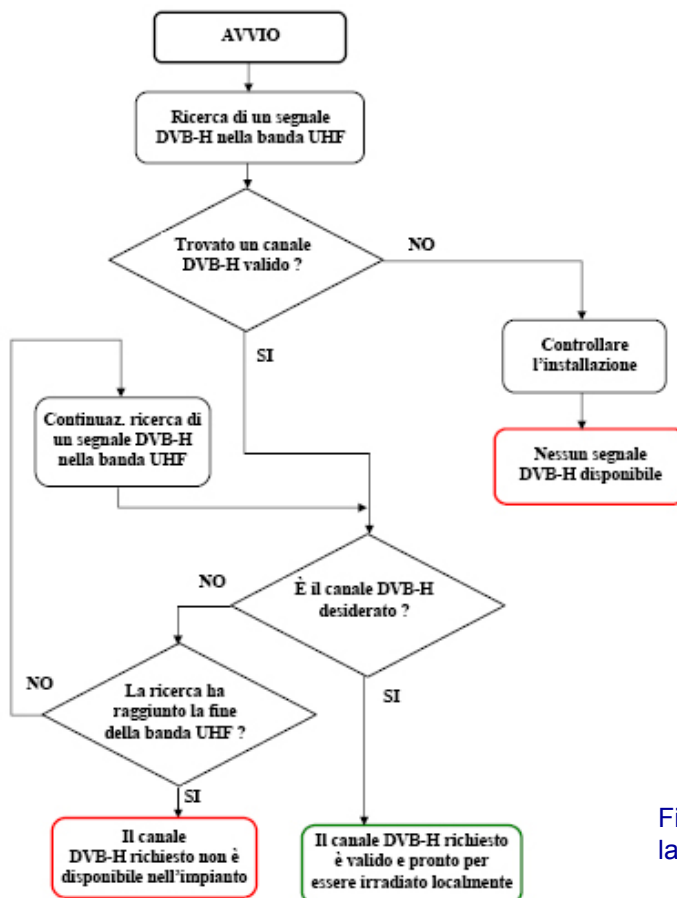



Fig. 4 – Possibile algoritmo per la procedura di installazione.

conseguentemente limitando la copertura.

La qualità del segnale irradiato viene infatti continuativamente monitorata da un ricevitore DVB-H integrato nel dispositivo durante intervalli di tempo di 1 secondo, verificando il rispetto dei seguenti criteri:

1. Assenza di pacchetti Transport Stream (TS) errati,
2. Bit Error Rate (BER) dopo la decodifica di Viterbi $\leq 2 \cdot 10^{-4}$.

La figura 5 riporta il diagramma a stati di un algoritmo di riferimento per il controllo automatico della potenza. All'accensione del dispositivo, terminata la fase di installazione descritta nel paragrafo 2.5 e verificato che il segnale d'ingresso è un segnale DVB-H valido, il meccanismo di controllo automatico cercherà di incrementare la potenza fino al massimo valore consentito, a patto che siano rispettati i criteri sopra indicati. Se il segnale è di buona qualità la potenza potrà essere aumentata rapidamente (stato S4a); in caso di errori verrà invece adottata una procedura più lenta (stato S4b) per regolare la potenza al valore ottimale. Il dispositivo rimarrà quindi nello stato di normale operatività (S5), a meno che non intervengano fattori esterni a degradare la qualità del segnale.

Potrà naturalmente accadere che, di tanto in tanto, a causa di peggiorate condizioni di ricezione (ad es. interferenza impulsiva), il segnale d'uscita sia affetto da qualche errore saltuario. Tuttavia, in caso di disturbi importanti (ad es. oscillazione, perdita di un valido segnale DVB-H d'ingresso, ecc.), il ripetitore dovrà in ogni caso evitare di irradiare un segnale degradato (riducendo adeguatamente la potenza d'uscita o, se necessario, andando in stand-by) entro 5 secondi.

3. Verifiche sperimentali sui primi prototipi

Con lo scopo di convalidare e affinare le specifiche tecniche in corso di preparazione, è stata condotta una campagna di test in laboratorio e in un appartamento reale [8], utilizzando i primi prototipi di ripetitori DVB-H domestici realizzati

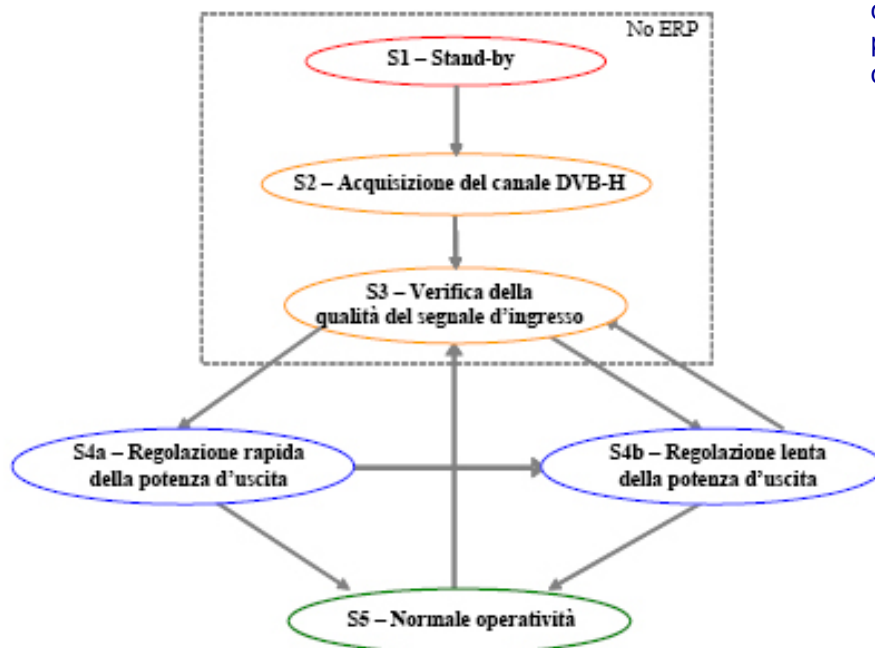



Fig. 5 – Diagramma a stati di un algoritmo di riferimento per il controllo automatico della potenza emessa

da aziende del settore, quali Fracarro, Microtune e Televés. La sperimentazione è stata condotta nell'ambito del Progetto Europeo CELTIC B21C (Broadcast for the 21st Century).

La figura 6 riporta le fotografie di alcuni dei prototipi considerati.

3.1 Valutazione della copertura

La copertura di un ripetitore DVB-H domestico, con potenza di trasmissione pari al valore nominale di 0 dBm, è stata valutata in due tipologie di ambiente:

- ◊ Laboratori Rai-CRIT,
- ◊ Appartamento reale.

3.1.1 Copertura nei laboratori Rai-CRIT

I laboratori Rai-CRIT (Torino, Corso Giambone) sono caratterizzati da ampie stanze, arredamento in metallo e muri divisori spessi.

I punti di misura sono stati scelti su di una griglia con passo di circa 2,5 m. I risultati di copertura, in termini di potenza ricevuta all'uscita dell'antenna ricevente, sono riportati nella figura 7, relativa ad un segnale con modulazione QPSK 1/2 (canale DVB-H Rai disponibile nell'area di Torino) e ricevitore con antenna integrata (guadagno minimo pari a -12 dBd [3]). In questo caso specifico, l'antenna trasmittente, posizionata nel punto rosso indicato sulla piantina, è stata posta ad un'altezza di 135 cm.

Le pareti gialle della figura delimitano le stanze, mentre la potenza ricevuta è indicata secondo una scala di colori (valori più alti in rosso). Il piano orizzontale indica la soglia di ricezione nel caso QPSK 1/2: le aree al di sotto di questo piano indicano una mancanza di copertura.

Come si può vedere, l'attenuazione dovuta ai muri divisori è di circa 10 dB (per muro).

La percentuale di copertura nelle varie stanze nelle stesse condizioni è indicata nella figura 8 (l'area totale è di 555 m^2).

La tabella 1 fornisce i risultati in termini di area coperta, confrontando casi con diversa ERP e diversa altezza in cui è posta l'antenna trasmittente. Se ne desume che, in questa tipologia di ambiente, con segnali QPSK 1/2 è possibile coprire un'area di circa 300 m^2.

La tabella 2 permette invece di confrontare i risultati nei casi di modulazione QPSK e 16-QAM, e con due tipologie di terminali (con antenna integrata oppure esterna)

3.1.2 Copertura in un appartamento reale

L'appartamento reale considerato (Torino, Corso Orbassano) è di dimensioni ridotte (50 m^2) e ancora privo di arredamento.

I punti di misura si riferiscono ad una griglia con passo di circa 0,6 m. I risultati di copertura sono riportati nella figura 9, relativa ad un segnale DVB- H con modulazione QPSK 1/2 e ricevitore con antenna integrata.

Fig. 6 – Fotografie di prototipi di ripetitori DVB H domestici

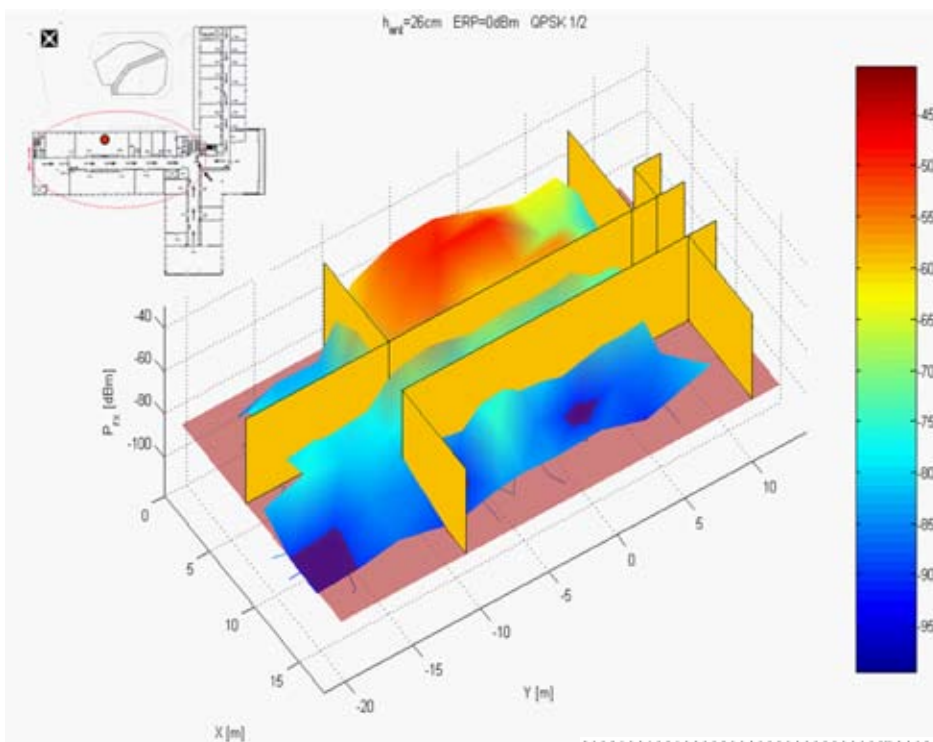



Fig. 7 – Copertura misurata nei laboratori Rai-CRIT.

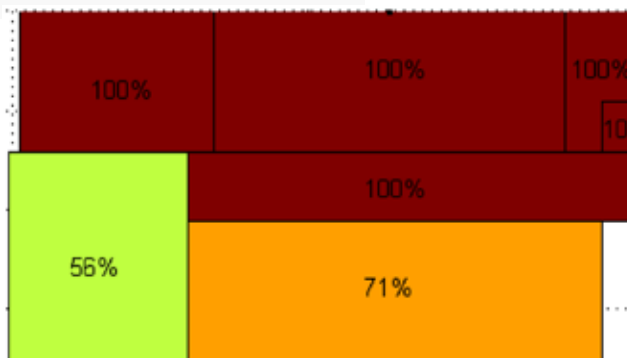



Fig. 8 – Percentuale di copertura per stanza nei laboratori Rai-CRIT.

Tab. 1

Area coperta (QPSK 1/2)		
	ERP 0 dBm	ERP -10dBm
h_{ant} 135 cm	457 m^2	133 m^2
h_{ant} 25 cm	307 m^2	133 m^2

Tab. 2

Area di copertura con diverse modulazioni (ERP 0 dBm, h_{ant} 25 cm)						
	Antenna integrata (-12 dBd)			Antenna esterna (-5 dBd)		
Modulazione	% copertura	N° stanze coperte (>95%)	Area di copertura (>95%)	% copertura	N° stanze coperte (>95%)	Area di copertura (>95%)
QPSK 1/2	88%	5	307 m^2	100%	7	555 m^2
QPSK 2/3	82%	3	214 m^2	100%	7	555 m^2
16-QAM 1/2	69%	1	128 m^2	95%	5	307 m^2
16-QAM 2/3	59%	1	128 m^2	86%	4	236 m^2

In questo piccolo appartamento è possibile ottenere una copertura del 100% anche con modulazione 16-QAM 2/3. In particolare la figura 10, che riporta la copertura (in metri quadri e in percentuale) a diversi valori di ERP, mostra che sarebbe possibile ottenere il 95% di copertura anche con ERP di -10 dBm.

Se, come nel caso in esame, l'appartamento ha dimensione inferiore rispetto alla copertura stimata del ripetitore domestico, è probabile che gli effetti di quest'ultimo si propaghino anche negli appartamenti adiacenti. Tuttavia, dal momento che è reirradiato lo stesso segnale già presente in etere, con vincoli stringenti in termini di ritardo introdotto, i segnali generati da diversi ripetitori domestici installati in diversi appartamenti si sommano in modo coerente come in una rete SFN, migliorando la ricezione piuttosto che peggiorarla. Le prestazioni in queste condizioni sono state verificate sperimentalmente; la figura 11 riporta lo spettro di potenza del segnale ricevuto in uno dei punti di misura.

3.2 Valutazione delle interferenze verso altri servizi televisivi

Come detto, il nuovo standard che regolamenterà i ripetitori DVB-H domestici si pone come obiettivo prioritario l'assenza di interferenze verso altri servizi televisivi distribuiti nella stessa banda UHF, analogici o digitali, ricevuti nello stesso appartamento o in quelli dei vicini di casa.

Al fine di confermare la validità delle specifiche sotto questo punto di vista, è stata condotta una serie di misure di qualità sui canali adiacenti (con particolare riguardo ai canali N±1, N±2 e N±3), considerando un certo numero di prototipi di ripetitore caratterizzati da diverse risposte in frequenza. Il rischio maggiore è infatti che la selettività del filtro utilizzato dal dispositivo non impedisca la reirradiazione, oltre al canale DVB-H desiderato, anche delle repliche dei canali adiacenti, presenti alla presa d'antenna e quindi inviati all'ingresso del ripetitore. È stato pertanto verificato se queste repliche, attenuate dalla

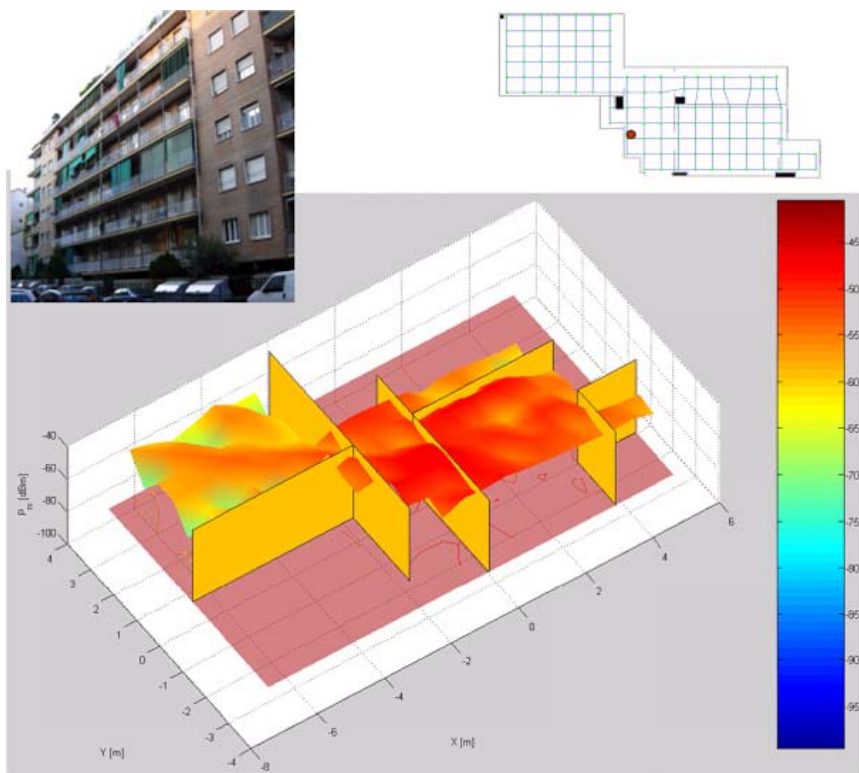



Fig. 9 – Copertura misurata in un appartamento reale.

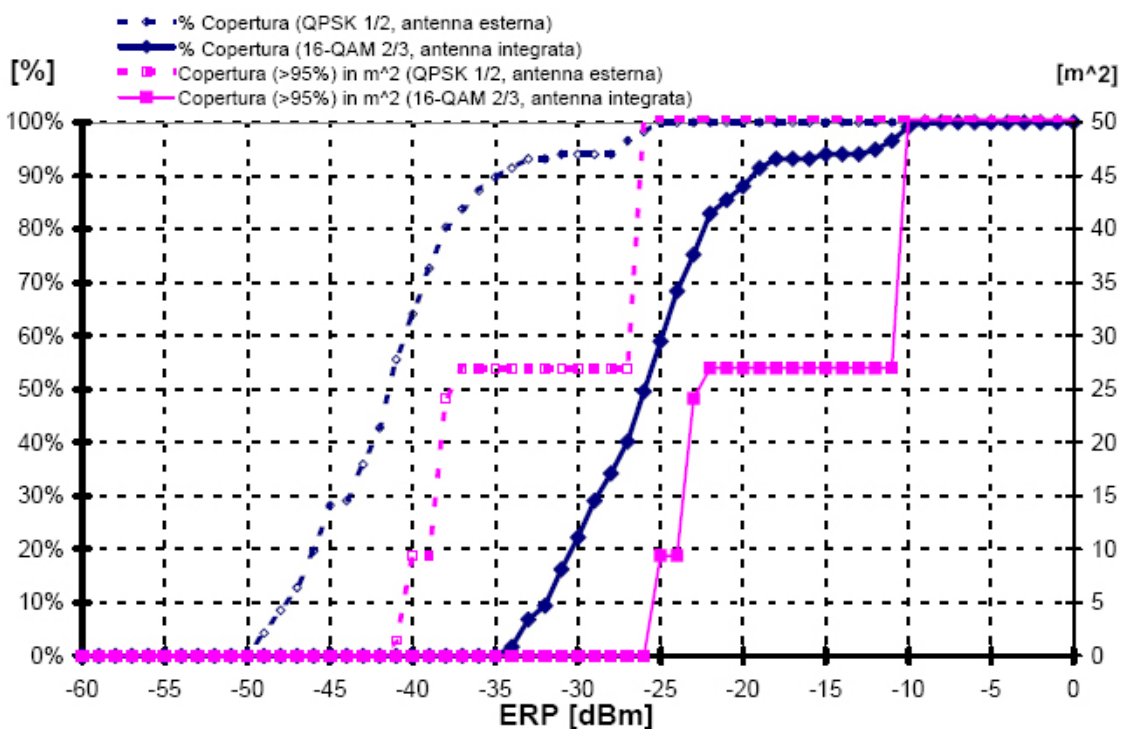



Fig. 10 – Copertura in un appartamento reale al variare della ERP.

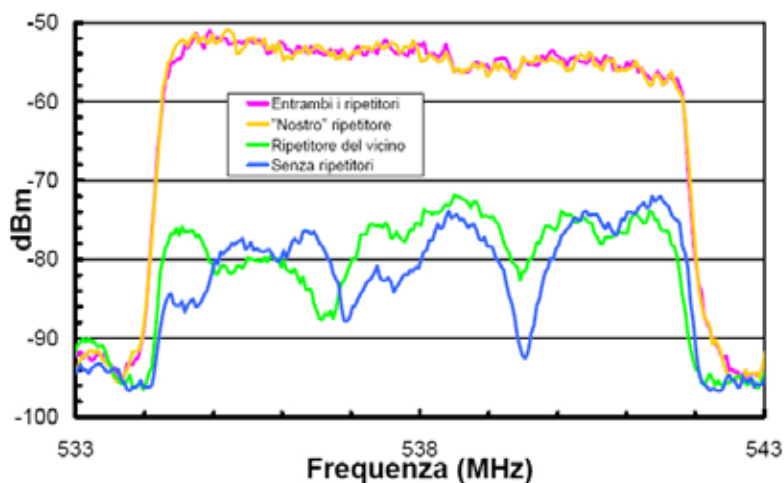



Fig. 11 – Spettri di potenza del segnale generato da due ripetitori domestici.

Fig. 12 – Spettro di potenza dei segnali all'ingresso del ripetitore domestico.

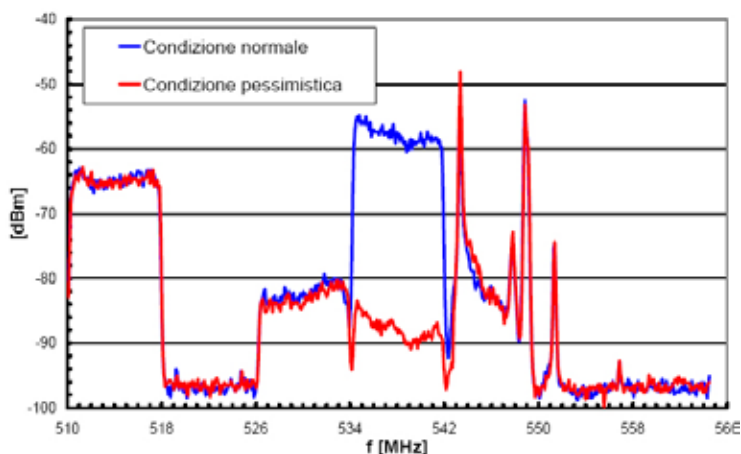
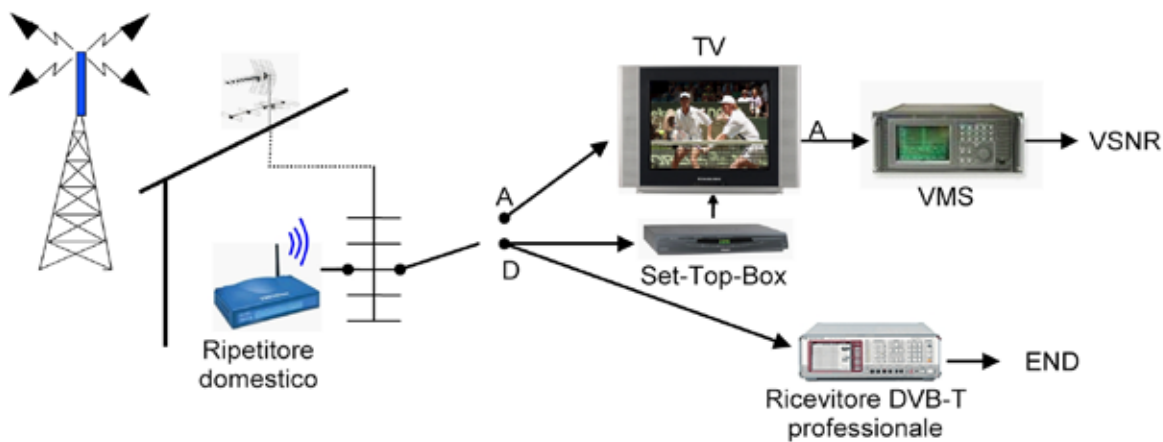



Fig. 13 – Valutazione dell'interferenza su altri servizi TV - Scenario 1.

risposta in frequenza del filtro, sommandosi al segnale utile normalmente ricevuto dal televisore possono degradare la qualità dell'immagine percepita dall'utente.

Sono stati considerati diversi scenari, tra i quali i più significativi sono i seguenti:

- ◊ Televisore (o STB DVB-T) collegato ad un'altra presa dell'impianto centralizzato d'antenna;
- ◊ Televisore (o STB) collegato ad un'antenna amplificata indoor, in un'altra stanza rispetto al ripetitore DVB-H domestico, con un solo muro di separazione e ad una distanza di 3 m.

L'entità del disturbo è stata valutata sui canali adiacenti sia soggettivamente, sulla base della qualità dell'immagine percepita dall'utente, sia oggettivamente, misurando la riduzione del rapporto segnale/rumore video (VSNR) nel caso di segnali analogici, o la riduzione del rapporto segnale/rumore alla soglia di ricezione (END) nel caso di segnali digitali.

Tipicamente, i segnali DVB-H sono pianificati con livelli di campo elettromagnetico più elevati rispetto ai servizi televisivi tradizionali. Tuttavia, il disturbo sugli altri servizi è stato valutato anche in un caso particolarmente critico, in cui i canali adiacenti sono ricevuti nell'impianto d'antenna con livello 30 dB superiore rispetto al canale DVB-H. L'entità della potenziale interferenza dipende infatti anche dai livelli relativi dei segnali in ingresso al ripetitore: maggiore è il livello dei canali adiacenti rispetto al canale utile, maggiori saranno le repliche reirradiate.

Lo spettro di potenza dei segnali all'ingresso del ripetitore domestico è mostrato nella figura 12: si noti in particolare la presenza di un canale analogico (RaiDue, canale 30) adiacente al canale DVB-H da ritrasmettere (canale 29, frequenza cen-trale 538 MHz).

3.2.1 Scenario 1: TV collegato a impianto centralizzato d'antenna

Questo scenario, riportato nella figura 13, permette di valutare eventuali problemi causati dalla limitata schermatura dei componenti dell'impianto di distribuzione.

Sono state considerate più tipologie di impianti centralizzati, con componenti resistivi (utilizzati in vecchie installazioni) o induttivi.

In tutti i casi, la riduzione del VSNR sul canale analogico adiacente è risultata inferiore a 1 dB, non percepibile dall'utente, mentre non è stato registrato alcun degradamento sui canali digitali.

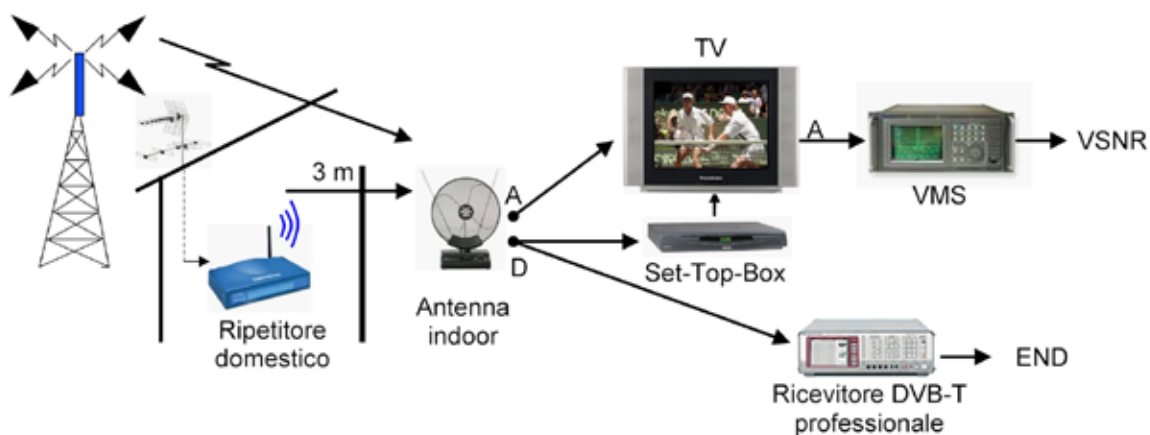



Fig. 14 – Valutazione dell'interferenza su altri servizi TV - Scenario 2.

3.2.2 Scenario 2: altra stanza, TV collegato ad antenna indoor

In questo scenario, riportato nella figura 14, il vicino di casa sta guardando la televisione in una stanza adiacente a quella in cui è installato il ripetitore DVB-H domestico, separata da una sola parete, ed utilizza per la ricezione televisiva un'antenna amplificata indoor posta ad una distanza di 3 m rispetto all'antenna trasmittente del ripetitore.

In queste condizioni, utilizzando prototipi di ripetitore domestico con risposta in frequenza in accordo con le specifiche, il VSNR sul canale analogico adiacente superiore (N+1) si è mantenuto entro 2 dB (valore compatibile con la precisione della misura, tenendo conto anche della variabilità delle condizioni di ricezione nel caso di antenna indoor), senza percepibile degradamento della qualità dell'immagine.

Si è inoltre verificato che non si registrano degradamenti visibili sull'immagine neanche utilizzando un segnale d'ingresso al ripetitore secondo le condizioni pessimistiche indicate nella figura 12, ovvero con canale adiacente con livello di 30 dB maggiore del canale DVB-H. Questa condizione è riportata nella figura 15, che mostra lo spettro

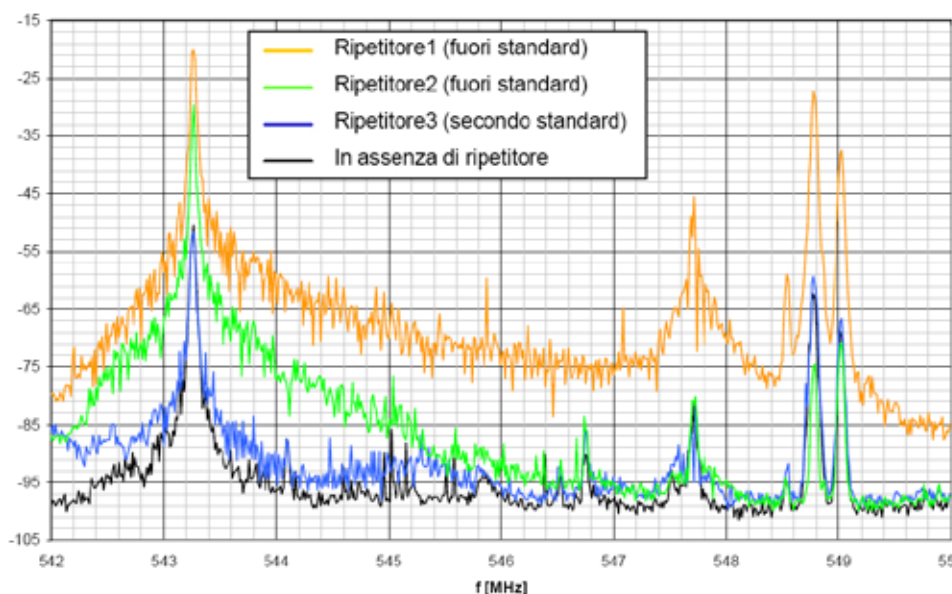



Fig. 15 – Canale analogico adiacente superiore: spettro di potenza con e senza ripetitore DVB-H domestico – Scenario 2, condizione pessimistica.

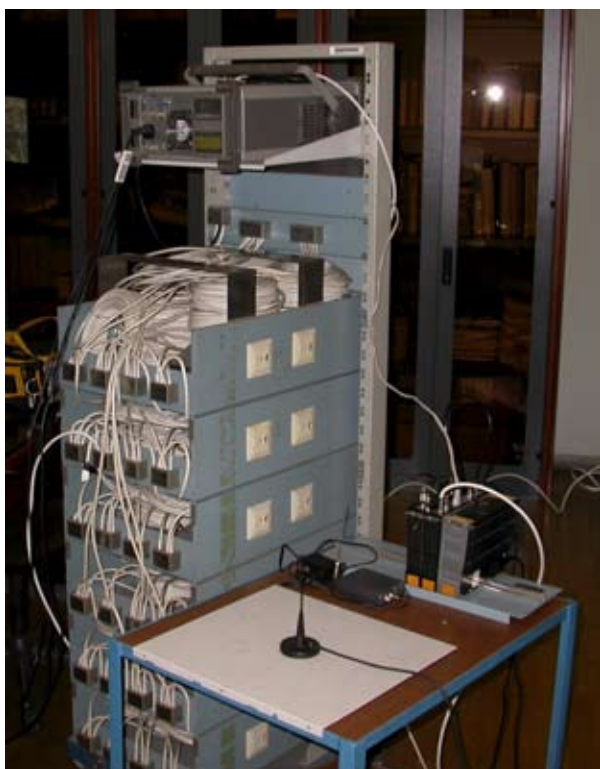



Fig. 16 – Oscillazione del ripetitore DVB-H domestico riprodotta in laboratorio.

di potenza del solo canale analogico adiacente utilizzando diversi prototipi di ripetitore. La curva blu, relativa all'unico dispositivo dei tre raffigurati che rispetta la risposta in frequenza raccomandata dallo standard, è quasi sovrapposta alla curva nera, relativa al segnale ricevuto in assenza di ripetitore nella stanza adiacente (in particolare, si può osservare che la portante video non è amplificata), a dimostrazione dell'assenza di significative repliche reirradiate.

Utilizzando invece gli altri due prototipi (relativi alle curve verde e arancione), che non rispettano lo standard, curiosamente la qualità dell'immagine sul televisore, almeno nel caso in esame, è risultata migliorata anziché peggiorata dal ripetitore: ciò significa che il segnale del canale adiacente prelevato dall'impianto e reirradiato in locale era di qualità migliore rispetto al segnale ricevuto direttamente dal trasmettitore mediante l'antenna indoor. Si tratterebbe comunque di una condizione non accettabile, a causa della reirradiazione di altri segnali, potenzialmente disturbanti, oltre al canale DVB-H.

Per quanto riguarda i segnali digitali, anche in questo scenario non è stato rilevato alcun disturbo.

3.3 Oscillazione del ripetitore e controllo automatico di potenza

Il problema delle auto-oscillazioni in un ripetitore DVB-H domestico è comune per tutti i ripetitori che ritrasmettono sulla stessa frequenza del segnale ricevuto. Il fenomeno deriva generalmente dall'accoppiamento tra l'antenna di trasmissione e quella di ricezione, che crea un feedback tra uscita e ingresso del sistema producendo una serie di echi. Se il guadagno di anello è unitario il sistema oscilla in modo costante, se è maggiore di 1 il sistema diventa instabile, mentre occorre mantenerlo minore di 1 per il corretto funzionamento del ripetitore.

Nel caso in esame, dal momento che il ripetitore domestico è tipicamente collegato ad un'antenna sul tetto dell'edificio, sufficientemente lontana dall'antenna trasmittente, il segnale irradiato potrebbe rientrare all'ingresso dell'amplificatore attraverso i componenti dell'impianto centralizzato d'antenna (prese, cavi, derivatori) qualora questi presentino un'insufficiente schermatura.

3.3.1 Effetti dell'oscillazione del ripetitore

Gli effetti dell'oscillazione del ripetitore sono stati riscontrati nel corso di misure in un appartamento reale, utilizzando un prototipo privo di meccanismo di controllo automatico di potenza. La condizione è stata successivamente riprodotta in laboratorio, ponendo l'antenna di trasmissione sufficientemente vicina ai componenti dell'impianto (figura 16). L'effetto risultante è visibile nello spettro di potenza riportato nella figura 17.

La condizione di oscillazione del ripetitore do-

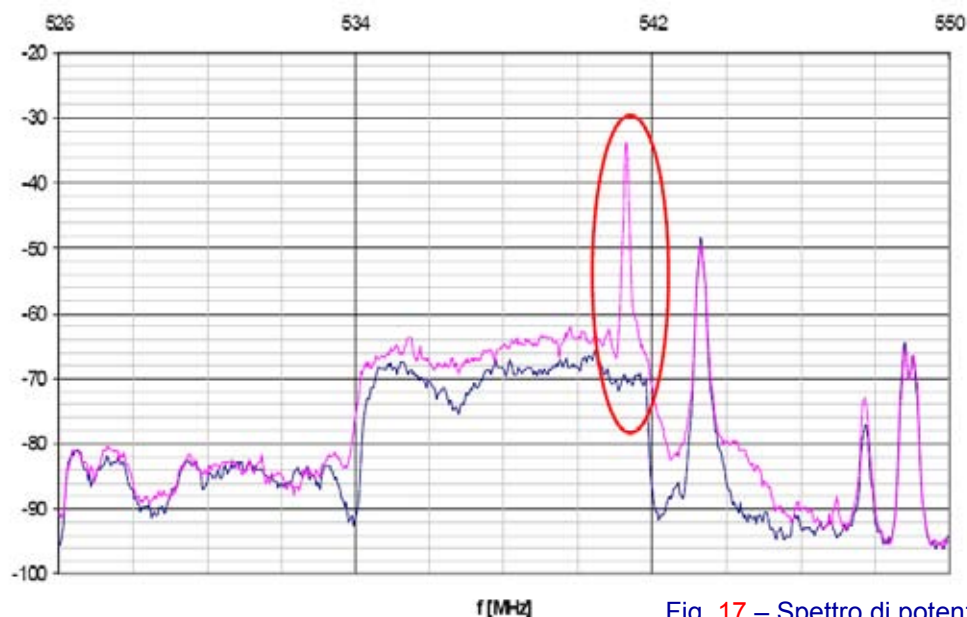



Fig. 17 – Spettro di potenza all'uscita di un ripetitore domestico in oscillazione

mestico deve essere assolutamente evitata: il disturbo generato sul canale DVB-H non avrebbe soltanto effetti nell'appartamento in cui il dispositivo è installato ma, attraverso l'impianto centralizzato, si propagherebbe all'ingresso di tutti gli altri eventuali ripetitori del condominio sintonizzati sullo stesso canale. Inoltre, mentre è stato verificato che l'oscillazione non disturba altri servizi televisivi analogici o digitali ricevuti dalle prese dell'impianto d'antenna, potrebbe causare interferenze in caso di ricezione con antenna amplificata indoor: i possibili effetti sull'immagine televisiva (canale analogico adiacente superiore) sono mostrati nella figura 18.

La presenza di un meccanismo di controllo automatico della potenza emessa è pertanto necessaria.

Fig. 18 – Effetti dell'oscillazione di un ripetitore DVB-H domestico sul canale TV analogico adiacente ricevuto da antenna amplificata indoor.
a) Senza ripetitore, b) Con ripetitore in oscillazione

3.3.2 Verifica sperimentale del meccanismo di controllo automatico di potenza

L'algoritmo di controllo automatico descritto nella figura 5 è stato verificato in laboratorio su di un prototipo di ripetitore domestico, al fine di valutarne la rispondenza alle specifiche indicate nel paragrafo 2.6 sia in una situazione ottimale che in presenza di condizioni di innesco dell'oscillazione o di diverse possibili cause di degradamento del segnale d'ingresso (mancanza di segnale, rumore, interferenze, ecc.).

In particolare, è stato verificato il corretto funzionamento del dispositivo nei casi ritenuti rappresentativi della maggior parte delle condizioni di lavoro:

- ◊ Fase di attivazione del ripetitore domestico, per verificare il corretto incremento controllato della potenza d'uscita, con segnale d'ingresso di buona o cattiva qualità (C/N alto o basso), con buono o insufficiente isolamento dell'impianto (e conseguente rischio di oscillazione), in assenza o presenza di interferenza impulsiva;

- ◊ Degradamento introdotto partendo da una situazione di normale operatività, per verificare la reazione del dispositivo a mutate condizioni ambientali, in presenza di interferenza impulsiva, di degradazione brusca o graduale del C/N, di mancanza del segnale d'ingresso, di condizioni di oscillazione.

I tempi di reazione del dispositivo si sono rivelati soddisfacenti e compatibili con i requisiti.

4. Conclusioni

L'utilizzo di ripetitori domestici per migliorare la copertura indoor dei segnali DVB-H rappresenta un'alternativa valida e poco costosa, soprattutto nella fase di introduzione del servizio, all'installazione capillare di trasmettitori cittadini da parte del broadcaster. Questa soluzione consente infatti di rendere il servizio immediatamente disponibile nelle abitazioni degli utenti interessati e superare le problematiche legate alla ricezione indoor nei piani bassi degli edifici.

Dal momento che questi dispositivi, installati autonomamente dall'utente, irradiano nella banda UHF, è prioritario garantire che non siano in alcun modo generate interferenze che potrebbero disturbare la ricezione, nello stesso appartamento e nel vicinato, dei normali programmi televisivi analogici o digitali distribuiti nella stessa banda, o di altri servizi. Per questa ragione, uno specifico standard da sottoporre all'ETSI è in corso di preparazione presso il DVB. In particolare, è richiesto ai ripetitori domestici un filtraggio selettivo del canale DVB-H ed è necessaria l'adozione di un meccanismo di controllo automatico della potenza emessa basato sulla qualità del segnale d'uscita, al fine di prevenire la trasmissione di segnali potenzialmente disturbanti.

Misure sperimentali, condotte sui primi prototipi di ripetitore domestico realizzati da aziende del settore, hanno permesso di verificare l'adeguatezza delle specifiche (e in alcuni casi di affinarle) in termini di area di copertura, interferenza verso altri servizi, problematiche di auto-oscillazione, ecc.

Si ritiene quindi che questa soluzione sia tecnologicamente matura e, non appena lo standard sarà stato approvato dall'ETSI, i ripetitori DVB-H domestici potranno essere disponibili per l'utente finale.

Bibliografia

1. ETSI: “Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission Systems for Handheld Terminals”, EN 302 304 V1.1.1, Novembre 2004.
2. A. Bertella, P. Casagranda, D. Milanesio, M. Tabone: “Il sistema DVB H per la TV mobile”, “Elettronica e Telecomunicazioni”, n° 3, Dicembre 2005.
3. ETSI: “Digital Video Broadcasting (DVB); DVB H Implementation Guidelines”, EN 102 377 V1.2.3, Marzo 2007.
4. C. Migliardi: “Il DVB H e la TV Mobile: nuovi contenuti per nuove modalità di fruizione”, Tesi di Laurea in Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione, Torino, Luglio 2006.
5. S. Mason: “Mobile TV – Results from the DVB-H trial in Oxford”, EBU Technical Review, Aprile 2006.
6. J. Mäki: “Finnish Mobile TV Pilot: Results”, http://www.mobiletvforum.com, Agosto 2005.
7. G. Alberico, A. Bertella, D. Milanesio, S. Ripamonti, B. Sacco, V. Sardella, M. Tabone, P.B. Forni: “Urban transmitters and domestic gap-fillers for DVB H”, IBC’07, Amsterdam, Settembre 2007.
8. C. Caudera, D. Mereu: “Gap Filler domestici per segnali DVB-H – Valutazione sperimentale delle prestazioni e analisi dei requisiti tecnici”, Politecnico di Torino, Tesi di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni, Aprile 2007.

La ripresa stereoscopica

ing. Mario **Muratori**

Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario
Nel campo televisivo è comune utilizzare una coppia di telecamere - reali oppure, nell'ambito della computer grafica, virtuali – per generare i segnali costituenti una "coppia stereoscopica".
Un sistema di ripresa composto da due telecamere può essere disposto so-lamente secondo due configurazioni geometriche: infatti, posto che devono giacere sullo stesso piano, gli assi ottici delle telecamere possono essere paralleli o convergere in un punto.
In questo articolo si analizzano le proprietà geometriche delle due configu-razioni, ricavando le relazioni che descrivono la conversione tra lo spazio reale della scena ripresa e lo spazio percepito in fase di visualizzazione.

1. Introduzione

In [1] si illustrano i principi di funzionamento della stereoscopia.

Questi si basano su alcune caratteristiche della visione umana; in particolare sulla convergenza oculare verso un punto (*punto di fissazione*), in genere ubicato in posizione centrale rispetto all'oggetto di interesse, e sull'analisi delle disparità tra i punti retinici corrispondenti (*stereopsi*), resa possibile dal fenomeno della *fusione sensoriale* grazie alla quale l'immagine che si focalizza sui punti retinici corrispondenti viene percepita come appartenente allo stesso oggetto.

La prima caratteristica implica che le due scene viste dai due occhi siano percepite come spazialmente coincidenti.

La seconda permette di valutare la posizione spaziale dei punti costituenti la superficie visibile dell'oggetto rispetto al punto di fissazione e quindi di percepire la tridimensionalità dell'oggetto osservato.

Le tecniche di visualizzazione stereoscopica riproducono virtualmente la *geometria di osservazione* - ossia la configurazione geometrica che si ha durante l'osservazione di una scena da parte di un osservatore reale - in modo da stimolare la visione tridimensionale stereoscopica nell'osservatore[Nota 1] [2].

Per ottenere ciò, le tecniche stereoscopiche che potremmo definire "tradizionali" utilizzano una coppia di segnali, chiamata *coppia stereoscopica*, veicolando il segnale corretto all'occhio corrispondente.

Negli stereoscopi in uso nel passato[Nota 2] come sorgenti di segnale si utilizzavano coppie di disegni o di fotografie; in campo cinematografico si svilupparono tecniche specifiche, per lo più basate su coppie di cineprese[Nota 3]; nel campo televisivo è comune utilizzare una coppia di telecamere - reali oppure, nell'ambito della computer grafica, virtuali.

Analizzando il processo di ripresa, emerge che nella conversione tra lo spazio reale e le immagini stereoscopiche si producono delle distorsioni, alcune delle quali dovute alla configurazione geometrica di ripresa, ossia all'orientazione e alla posizione dei sensori rispetto alla scena.

L'analisi delle distorsioni sarà tema di un prossimo articolo [3], mentre in questo lavoro si analizzano le configurazioni geometriche di ripresa stereoscopica esaminandone le caratteristiche.

2. Premessa

La postura normale dell'uomo è quella ritta sui piedi. In questo modo la testa è la parte del corpo più elevata e rimane in posizione pressoché verticale. Gli occhi di conseguenza risultano ubicati su una linea orizzontale[Nota 4].

In condizioni di normalità fisica, gli assi oculari sono complanari e convergenti verso il punto di convergenza; solo in presenza di patologie possono risultare sghembi. Tale condizione impone delle restrizioni alle possibili configurazioni della geometria di osservazione.

Nella ripresa stereoscopica, al posto degli occhi dell'ipotetico osservatore si pongono dei sensori. Pertanto la geometria di ripresa eredita alcune caratteristiche di quella di osservazione; in particolare si verificano dei legami geometrici tra i punti della scena ripresa tridimensionale e le relative proiezioni sui piani bidimensionali dei sensori, tali da porre delle restrizioni sul loro posizionamento.

Tali legami sono analizzati nell'ambito della *geometria epipolare*[Nota 5].

Nell'analisi del processo di ripresa, si assume che i sensori possano essere modellati come se fossero delle *camere ottiche*[Nota 6]. Questo semplifica l'analisi geometrica perché si evita di dover prendere in considerazione le caratteristiche geometriche delle ottiche reali e, soprattutto, le loro distorsioni e aberrazioni.

Nota 1 - Per la precisione si cerca principalmente di stimolare la stereopsi.
Nota 2 - Con riferimento allo stereoscopio di Wheastone del 1834, ma anche al più recente sistema ViewMaster che ha goduto di una vasta diffusione nel periodo 1920-1980 circa.
Nota 3 - Ad esempio, il sistema IMAX-3D adotta una coppia di cineprese binate.
Nota 4 - Si dà qui per scontato che le direzioni "verticale" e "orizzontale" siano note e univocamente determinate: la prima è parallela alle linee di forza gravitazionale e la seconda è perpendicolare alla prima e parallela alla tangente al geode terrestre.
Nota 5 - Vedi http://en.wikipedia.org/wiki/Epipolar_geometry e il riquadro relativo.
Nota 6 - Nota anche come camera oscura. Nella letteratura in lingua inglese si utilizza il termine pin hole camera. Vedi http://it.wikipedia.org/wiki/Camera_oscura e il riquadro relativo.

2.1. I sistemi di riferimento

Per effettuare le analisi geometriche necessarie a stabilire le relazioni tra i punti della scena ripresa e i punti della scena percepita, conviene definire dei sistemi di riferimento cartesiani opportunamente posizionati e orientati.

Il sistema di riferimento per i sensori corrisponde a quello utilizzato nel modello basato sulla camera ottica e si può considerare adagiato sul piano immagine. Ovviamente ci saranno due sistemi di riferimento, uno per ogni camera considerata[Nota 7].

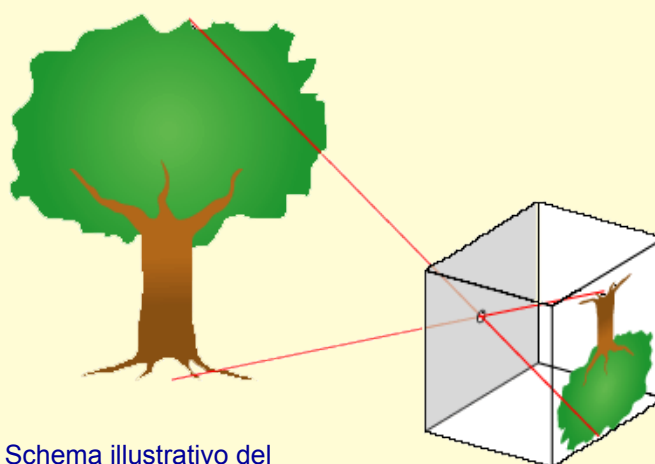
Nota 7 - Nella stereoscopia tradizionale si usano due camere.

La camera ottica.

Detta anche camera oscura, in inglese *pin hole camera*, è un dispositivo ottico che sta alla base di tutta la tecnica fotografica.

La proiezione dell'immagine di oggetti attraverso fori di piccole dimensioni fu osservata e descritta già attorno all'300 a.c. da studiosi greci quali Aristotele ed Euclide. Verso il decimo secolo, la camera oscura fu descritta con maggiore rigore scientifico dal matematico, astronomo e fisico arabo Ibn al-Haytham, che ne realizzò anche un primo esemplare[Nota a]. L'invenzione fu ripresa successivamente da Leonardo da Vinci e utilizzata nel Rinascimento come ausilio al disegno e alla pittura.

La versione adatta alla fotografia fu sviluppata a cavallo del 1800 dall'inventore Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833), ma la camera oscura fu utilizzata per usi fotografici solo all'inizio del 1900 quando la sensibilità dei materiali sensibili diventò sufficiente per evitare tempi di posa eccessivamente lunghi.

La camera oscura più semplice è formata da una scatola chiusa, con un piccolo foro, detto stenopeico (dal greco στενοσ οπαιοσ: "dotato di un piccolo foro"), su una faccia dal quale entra la luce. Quest'ultima forma sulla faccia opposta l'immagine reale capovolta di quanto si trova davanti al foro.

Schema illustrativo del funzionamento della camera ottica (http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Pinhole-camera.png).

Più il foro è piccolo, più l'immagine è nitida e definita, ma le dimensioni del foro non si possono ridurre più di un certo limite per evitare fenomeni di diffrazione e per lasciare entrare una quantità di luce sufficiente per gli usi pratici.

Il pregio maggiore di una camera così semplice è che tutti gli oggetti sono a fuoco a prescindere dalla loro distanza, ancorché le immagini possano essere poco nitide a causa delle dimensioni finite del foro stenopeico; in altre parole, il foro stenopeico si comporta come un obiettivo che non ha una sua lunghezza focale specifica e che ha profondità di campo illimitata.

La limitata quantità di luce entrante nel foro limita l'uso di tale camera alla ripresa di oggetti fissi, per i quali si possono adottare tempi di esposizione relativamente lunghi.

Nota a - Il termine camera deriva dall'arabo *qamara*, dal latino *camera* o *camara*, e dal greco σαμερα ; tutti questi termini indicavano un locale privato o scuro.

Il sistema di riferimento per la scena invece è unico e vale per ambedue le telecamere. Per questo motivo se ne pone l'origine in un punto centrale, ubicato sul piano di simmetria dell'apparato, come meglio illustrato nel paragrafo seguente.

Per derivare i legami tra i punti immagine e la scena percepita conviene inoltre introdurre un terzo sistema di riferimento utilizzato per descrivere la geometria di visione.

2.1.1. Il sistema di riferimento per la scena ripresa – coordinate scena

Al fine di individuare la posizione spaziale dei punti costituenti la scena, chiamati *punti oggetto*, si definisce un sistema cartesiano tridimensionale, illustrato in figura 1, che ha:

- ◊ l'origine sul punto medio del segmento congiungente i centri ottici dei due sensori (cioè i fori stenopeici dei modelli adottati per le telecamere);
- ◊ l'asse delle ascisse X adagiato sullo stesso segmento, con valori positivi verso sinistra (guardando verso l'asse delle Z); nell'uso comune si trova in posizione orizzontale;
- ◊ l'asse delle ordinate Y perpendicolare all'asse delle ascisse e rivolto verso l'alto; nell'uso comune si trova lungo la verticale;
- ◊ infine, l'asse Z perpendicolare ai due assi precedenti e rivolto verso la scena ripresa.

I sensori sono posizionati simmetricamente rispetto al piano ZY in ambedue le configurazioni che si analizzeranno in questo lavoro.

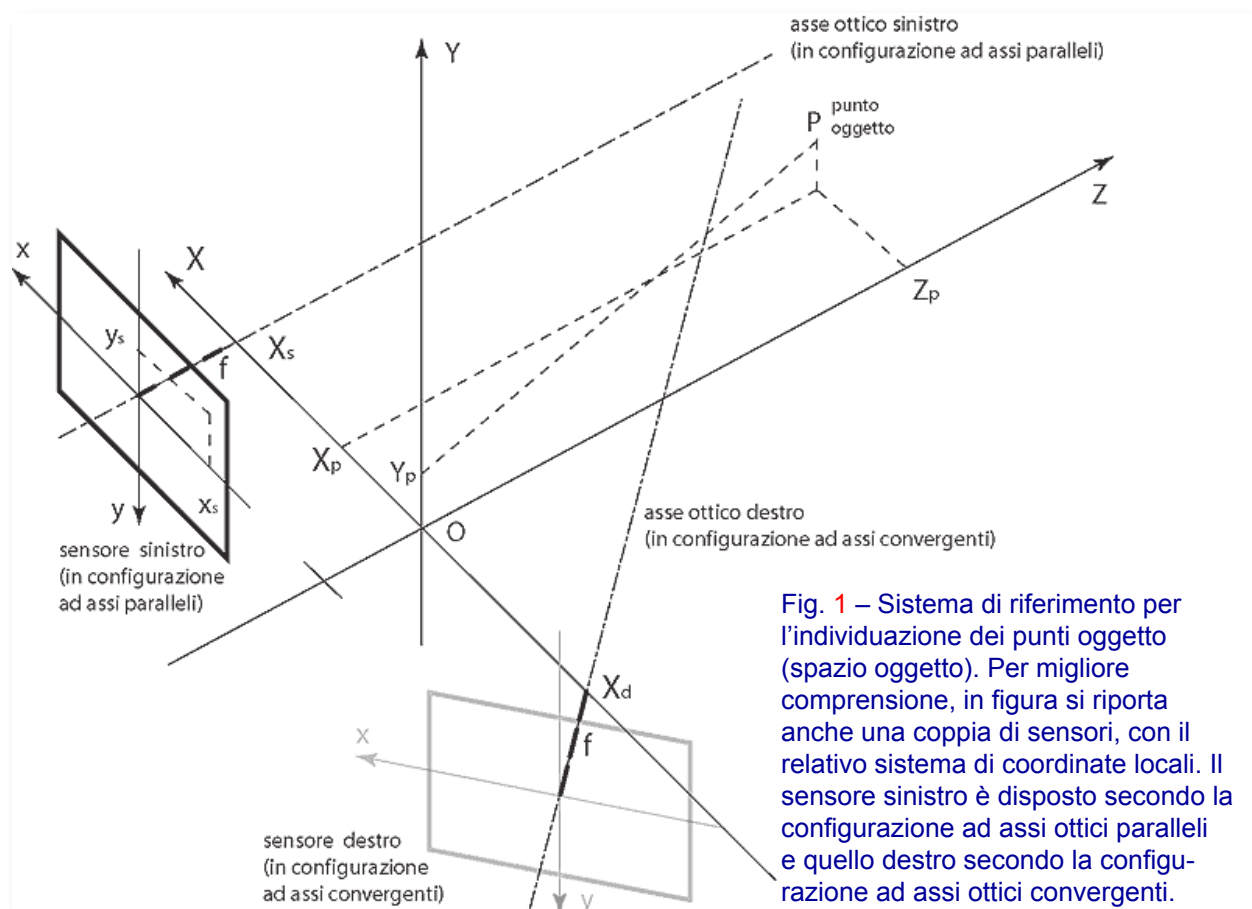



Fig. 1 – Sistema di riferimento per l'individuazione dei punti oggetto (spazio oggetto). Per migliore comprensione, in figura si riporta anche una coppia di sensori, con il relativo sistema di coordinate locali. Il sensore sinistro è disposto secondo la configurazione ad assi ottici paralleli e quello destro secondo la configurazione ad assi ottici convergenti.

In particolare i centri ottici delle camere ricadono nei punti (X_d, 0, 0) e (X_s, 0, 0) dove X_s = - X_d = b/2, e la distanza tra il centro del sensore e il centro ottico è pari alla distanza focale f.

Le due differenti configurazioni geometriche di ripresa si ottengono ruotando i sensori attorno ad un asse verticale passante per il centro ottico del modello relativo.

I principali parametri geometrici di cui tenere conto sono:

- X_p, Y_p, Z_p sono le coordinate del punto oggetto rispetto al sistema di riferimento XYZ. Z_p è la coordinata Z del punto oggetto; in prima approssimazione si può considerare uguale alla distanza del punto oggetto dalle telecamere.
- b = X_s - X_d è la distanza tra i centri ottici delle telecamere, che nel modello della camera ottica sono costituiti dal foro stenopeico; tale parametro si chiama *base stereoscopica*.
- f è la lunghezza focale delle ottiche delle telecamere. Nel modello della camera ottica consiste nella distanza tra il foro stenopeico (centro ottico) e il piano del sensore.

2.1.2. Il sistema di riferimento per i sensori – coordinate immagine

Per individuare la posizione dei punti costituenti la proiezione dei *punti oggetto* sulla superficie dei sensori, chiamati *punti immagine*, si definisce un sistema cartesiano bidimensionale, illustrato in figura 2, che ha l'origine nel centro del sensore, e, rispetto al sistema di coordinate definito per la scena (X,Y,Z), presenta l'asse delle ascisse x orientato verso sinistra, e l'asse delle ordinate y orientato verso il basso, come riportato in figura 1.

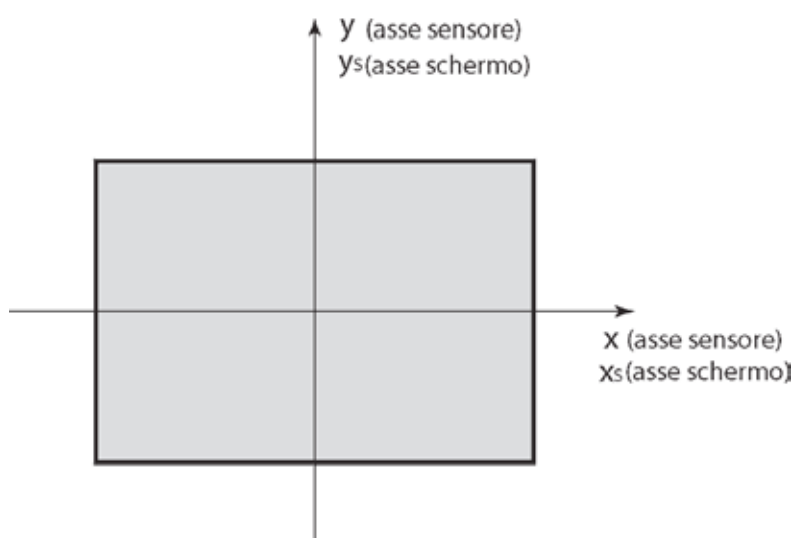
L'orientazione degli assi x e y illustrata in figura 1 permette di realizzare facilmente la rotazione di π (180°) attorno all'asse ottico del sensore, necessaria per "raddrizzare" l'immagine proiettata sul sensore stesso che, nel modello di camera ottica, risulta rovesciata rispetto alla scena ripresa.

A parte il fattore moltiplicativo M di cui si parla nel paragrafo 2.2 successivo, questo sistema di riferimento è utilizzabile anche per individuare un punto sullo schermo dell'apparato visualizzatore.

In questo caso, per evitare confusione, si indicano gli assi con i simboli x_S e y_S (la S in apice è maiuscola).

2.1.3. Il sistema di riferimento per la visione – coordinate osservatore

Per l'analisi della configurazione geometrica posta in essere in fase di visione si introduce un ulteriore sistema di riferimento, illustrato in figura 3a.

Fig. 2 – Sistema di riferimento per i punti immagine (per il sensore e per lo schermo).

La camera ottica come modello geometrico di telecamera generica

Per analizzare le relazioni geometriche intercorrenti tra le coordinate tridimensionali di un punto della scena ripresa e le coordinate della sua proiezione sul piano immagine, si utilizza un modello basato sulla camera ottica ideale.

Questo modello non include alcuna distorsione dovuta alle lenti degli obiettivi. Inoltre il piano immagine è considerato continuo, mentre molti sensori attuali, essendo costituiti da celle, presentano, di fatto, solo coordinate quantizzate.

Date le semplificazioni assunte, è da considerarsi un modello ideale di telecamera; tuttavia è rappresentativo e utile perché permette di concentrarsi sulla geometria complessiva evitando le complicazioni dovute alla complessa geometria ottica degli obiettivi reali e agli inevitabili fattori spuri, in particolare le distorsioni e le aberrazioni, che si verificano nella pratica.

Geometria della camera ottica

La geometria utilizzata per il modello della camera ottica è illustrato nella figura, dove sono anche riportati i componenti ed i parametri principali, in particolare:

Illustrazione della geometria della camera ottica.

- ◊ Un **sistema di coordinate cartesiane tridimensionali** con origine O nel punto focale della camera ottica (ossia il foro stenopeico). I tre assi del sistema di riferimento sono indicati con X,Y e Z. L'asse Z è rivolto verso la direzione in cui punta la camera ed è coincidente con l'asse ottico della stessa.
- ◊ Un **piano immagine** su cui viene proiettata, attraverso il foro stenopeico, la scena tridimensionale ripresa. Tale piano è parallelo al piano XY ed è posizionato ad una distanza *f* dall'origine O nella parte delle Z negative. Il parametro *f* è chiamato *lunghezza focale* della camera.
- ◊ Un **punto** P **appartenente alla scena** tridimensionale ripresa, con coordinate (X_p, Y_p, Z_p) relative al sistema d'assi cartesiani XYZ.
- ◊ Una **linea di proiezione** del punto P verso la camera, passante per il punto O (foro stenopeico).
- ◊ La proiezione del punto P sul piano immagine, individuata con la lettera p, e determinata dalla intersezione della linea di proiezione con il piano immagine.
- ◊ Un **sistema di coordinate cartesiane bidimensionali** con origine o nel centro del piano immagine (cioè del sensore). I due assi del sistema di riferimento sono indicati con x e y, e le coordina te del punto p rispetto a questo sitema di assi sono (x_p, y_p). In figura sono indicati i versi opportuni perché - dopo la rotazione di π (180°) del piano immagine attorno all'asse ottico, necessaria

per "raddrizzare" l'immagine in fase di visualizzazione - si ottenga un sistema con l'orientamento usuale degli assi cartesiani.

Il foro stenopeico, attraverso il quale passano tutte le linee di proiezione, si considera infinitamente piccolo. In una camera ottica reale non potrebbe avere dimensioni inferiori a certi limiti - finiti - sia per lasciare passare abbastanza luce per gli usi pratici, sia per evitare fenomeni di diffrazione luminosa. Tale punto coincide con l'origine O del sistema di coordinate cartesiane tridimensionali (X, Y, Z) usate per individuare i punti P della scena e viene chiamato anche con il termine punto focale della camera (*camera focal point*) o centro della camera (*camera center*).

La figura in questa pagina illustra la configurazione geometrica usata per ricavare le coordinate (x, y) del punto proiezione p a partire dalle coordinate tridimensionali (X, Y, Z) del punto della scena P. Tale configurazione è ricavata da quella complessiva illustrata nella figura della pagina precedente tramite proiezione su un piano parallelo a quello definito dagli assi X e Z.

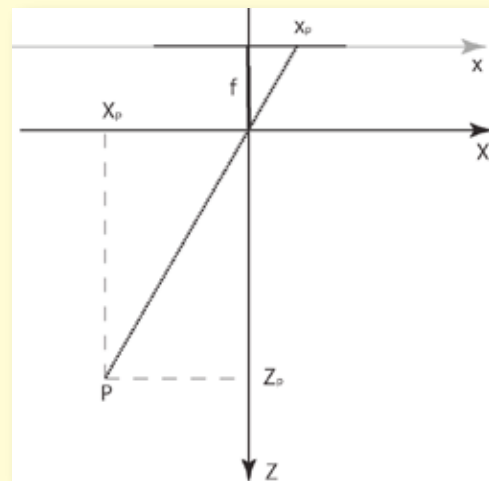
Dall'analisi della figura si può ricavare la seguente relazione:

1a) $$x_p = -\frac{fX_p}{Z_p}$$

Analogamente, considerando le ordinate, si ottiene:

1b) $$y_p = \frac{fY_p}{Z_p}$$

Le relazioni 1a) e 1b) possono essere compattate nella pratica notazione matriciale seguente:

2) $$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_p}\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix}$$

Geometria semplificata del modello di camera ottica (vista dall'asse Y).

La mappatura dalla scena 3D sul piano immagine 2D operata dalla camera è una proiezione prospettica seguita da una rotazione di 180° del piano immagine attorno all'asse ottico (è come se si osservasse l'immagine sul retro del sensore ponendosi a testa in giù).

Le dimensioni degli oggetti proiettati dipendono dalla loro distanza dalla camera (per la precisione dal valore della coordinata Z_p) e dalla lunghezza focale f.

Per ottenere direttamente immagini non ruotate si può:

- ◊ Ruotare il sistema di coordinate locali di 180°, posizione adottata nei paragrafi precedenti tramite il particolare orientamento degli assi x e y.
- ◊ Considerare non un piano immagine reale, che è posizionato in Z = -f, bensì un piano immagine virtuale posizionato in Z = +f. Tale posizione semplifica alcune formulazioni geometriche ed è utilizzata nell'ambito della geometria epipolare (vedi riquadro relativo).

Il centro O_o del sistema di coordinate cartesiane tridimensionali (X_o, Y_o, Z_o) è posto nel punto medio del segmento che unisce i centri ottici oculari, a loro volta ubicati sull'asse X_o in corrispondenza delle ascise X_{od} e X_{os}, rispettivamente per l'occhio destro e quello sinistro.

Lo schermo su cui viene visualizzata la coppia stereoscopica è posto sul piano $Z_o=Z_{os}$, parallelo al piano X_oY_o.

Il centro del sistema di coordinate definite su di esso si trova, per semplicità, sull'asse Z_o, e gli assi x_S e y_S sono paralleli, rispettivamente agli assi X_o e Y_o.

Il segmento $e = X_{os} – X_{od}$ rappresenta la distanza tra i centri ottici oculari e corrisponde alla base stereoscopica dell'osservatore. L'ordine dei termini è scelto opportunamente per ottenere un valore positivo, considerando il verso dell'asse X_o.

Il punto P ripreso dalla scena reale è proiettato sullo schermo nei punti P_d e P_s tramite, rispettivamente, la componente destra e quella sinistra della coppia stereoscopica. L'osservatore vede con l'occhio destro l'immagine di P_d e con quello sinistro l'immagine di P_s, percependo un singolo punto P_o posizionato in (X_o,Y_o,Z_o).

Si possono introdurre altre due grandezze molto importanti, ossia la *disparità orizzontale*, δ_{So}, e la *disparità verticale*, δ_{Sv}, definite come differenze di coordinate relative allo schermo e date dalle relazioni seguenti.

1a) $\delta_{So} = x_{Sd} – x_{Ss}$

1b) $\delta_{Sv} = y_{Sd} – y_{Ss}$

La prima è quella che genera la percezione della distanza e della profondità e quindi è una grandezza desiderata, che si cerca di preservare nell'intera filiera dalla ripresa alla visualizzazione.

La seconda genera affaticamento visivo senza dare informazioni. E' pertanto indesiderata, ma in certe situazioni è inevitabile.

Quando disparità orizzontale assume valori positivi, si parla di *disparità omonima*; gli assi ottici oculari si intersecano ad una distanza dall'osservatore maggiore della distanza dello schermo e conseguentemente il punto P_o viene percepito "al di là" dello schermo stesso.

Al contrario, quando disparità orizzontale assume valori negativi, si parla di *disparità crociata*; gli assi ottici oculari si intersecano ad una distanza dall'osservatore inferiore alla distanza dello schermo e conseguentemente il punto P_o viene percepito "al di qua" dello schermo, in una posizione intermedia tra l'osservatore e lo schermo stesso.

2.2. Relazioni tra sensore e schermo del display

L'immagine proiettata sul sensore in fase di ripresa viene rovesciata e proiettata sullo schermo del display in fase di visualizzazione.

Non ne viene modificata la forma, ma l'immagine è sempre ingrandita di un fattore M pari al rapporto tra la lunghezza della diagonale D dello schermo del display e quella della diagonale d del sensore:

2) $$M = \frac{D}{d}$$

Quindi le coordinate definite sullo schermo differiscono da quelle definite sui sensori dello stesso fattore moltiplicativo:

3a) $x_{Sd,s} = M\, x_{d,s}$

3b) $y_{Sd,s} = M\, y_{d,s}$

Per rendersi conto del valore di tale fattore moltiplicativo si consideri che i televisori HDTV o "HD ready" attuali sono dotati di schermi la cui diagonale varia tra i 32" e i 50", mentre i sensori delle telecamere professionali hanno diagonale pari a ½" o ¾". Quindi il fattore M ha un valore che varia, orientativamente, tra 43 e 100.

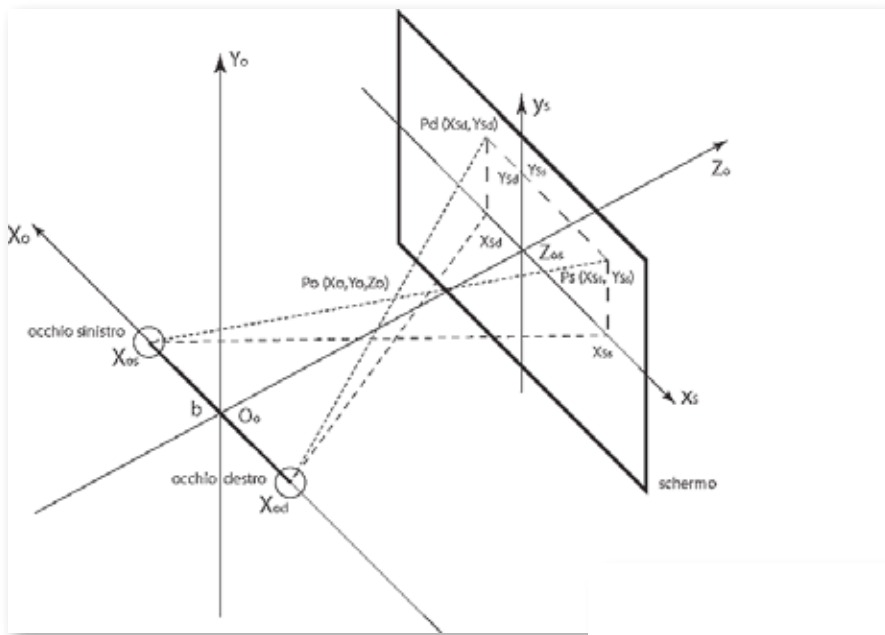



Fig. 3a – Sistema di riferimento per l'analisi geometrica della configurazione di visione.

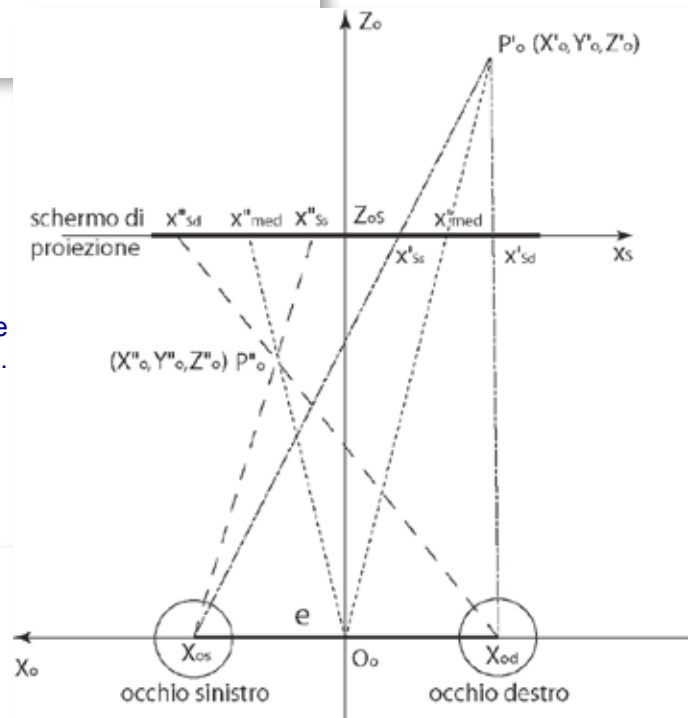
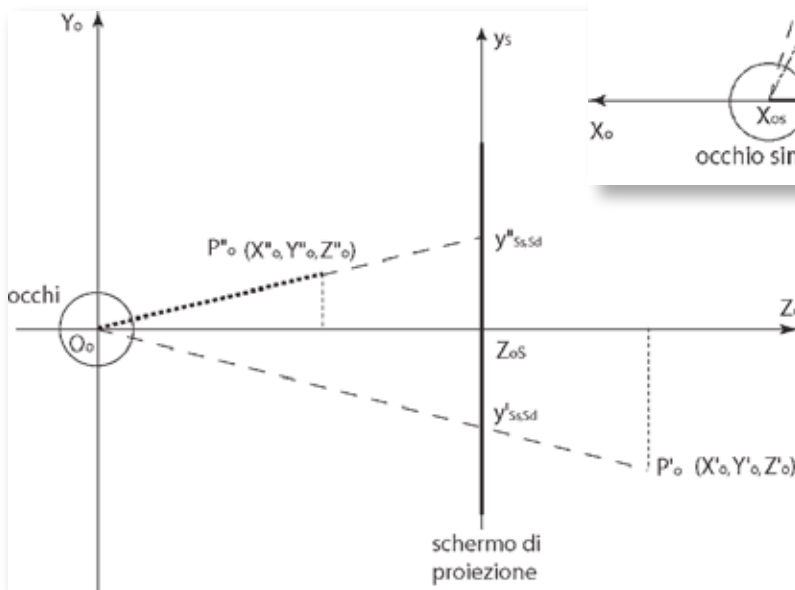



Fig. 3b – Proiezione su un piano orizzontale della configurazione di visione.

Fig. 3c - Proiezione su un piano verticale della configurazione di visione.

2.3. La geometria di visualizzazione

In [1] si riportano le basi della tecnica stereoscopica e si riportano relazioni che legano la disparità orizzontale con la percezione della distanza del punto visualizzato.

In questo paragrafo si completa tale derivazione aggiungendo anche le altre dimensioni; si introducono infatti le relazioni che legano la posizione percepita del punto visualizzato con la sua ubicazione nello spazio tridimensionale della scena.

Il modello geometrico adottato per queste derivazioni è illustrato in figura 3a.

La figura 3b riporta la proiezione, su un piano parallelo al piano X_oZ_o, della configurazione tridimensionale di visione illustrata in figura 3a.

In figura 3b sono illustrati i due casi tipici.

Nel caso in cui $x_{Sd} > x_{Ss}$, cioè quando il punto proiettato relativo all'occhio destro si trova più a destra di quello relativo all'occhio sinistro, si ha *disparità omonima*, e il punto visualizzato viene percepito "al di là" dello schermo (caso contrassegnato dall'apice singolo).

Al contrario, se $x_{Sd} < x_{Ss}$, cioè quando il punto proiettato relativo all'occhio sinistro si trova più a destra di quello relativo all'occhio destro, si ha *disparità crociata*; gli assi ottici oculari si incrociano in un punto posizionato tra l'osservatore e lo schermo e il punto visualizzato viene conseguentemente percepito "al di qua" dello schermo (caso contrassegnato dal doppio apice).

La coordinata Z_o dei punti P' e P" è data dalla seguente relazione, già derivata in [1], che risulta valida per ambedue i tipi di disparità per cui si tralasciano gli apici:

5a) $$Z_o = Z_{oS} \frac{e}{e - \delta_{So}}$$

Dove:

Z_o è la distanza del punto percepito
Z_{oS} è la distanza dello schermo dall'osservatore
$e = X_{os} - X_{od}$ è la distanza interoculare dell'osservatore
$\delta_{So} = x_{Sd} - x_{Ss}$ è la *disparità orizzontale* valutata tra punti immagine proiettati sullo schermo.

Si noti che la distanza del punto percepito dall'osservatore dipende solamente dalla distanza tra schermo e osservatore e dalla disparità orizzontale presentata dai punti proiettati sullo schermo, a prescindere dalla sua dimensione.

La coordinata X_o del punto percepito è data dalla seguente relazione, ricavata per similitudine tra i triangoli $O_oZ_oP_o$ e $O_oZ_oS_{xmed}$, dove x_{med} è il punto medio tra x_{Sd} e x_{Ss}; il segno meno tiene conto dell'opposto verso degli assi X_o e x_S; anche in questo caso la relazione vale per i due tipi di disparità per cui si tralasciano gli apici:

5b) $$X_o = -x_{med} \frac{e}{e - \delta_{So}}$$

Dove:

X_o è l'ascissa del punto percepito
$x_{med} = (x_{Sd} + x_{Ss}) / 2$ è il punto medio tra x_{Sd} e x_{Ss}
$e = X_{os} - X_{od}$ è la distanza interoculare dell'osservatore
$\delta_{So} = x_{Sd} - x_{Ss}$ è la *disparità orizzontale* valutata tra punti immagine proiettati sullo schermo.

Si noti che l'ascissa del punto percepito non dipende dalla distanza tra schermo e osservatore, ma dall'ubicazione dei punti proiettati sullo schermo e dalla loro disparità orizzontale.

La coordinata Y_o è data da una relazione che si ricava facilmente tramite la similitudine di triangoli (vedi la figura 3c); anche in questo caso la

relazione vale per i due tipi di disparità per cui si tralasciano gli apici:

$$5c)\quad Y_o = y_S \frac{e}{e-\delta_{So}} = \frac{y_{Sd}+y_{Ss}}{2}\frac{e}{e-\delta_{So}}$$

Dove:

Y_o è l'ordinata del punto percepito
y_S è l'ordinata del punto proiettato rispetto allo schermo
$e = X_{os} - X_{od}$ è la distanza interoculare dell'osservatore
$\delta_{So} = x_{Sd} - x_{Ss}$ è la disparità orizzontale valutata tra punti immagine proiettati sullo schermo.

Si noti che, analogamente all'ascissa, anche l'ordinata del punto percepito non dipende dalla distanza tra schermo e osservatore, ma solo dall'ubicazione dei punti proiettati sullo schermo e dalla loro disparità orizzontale.

In caso di presenza di disparità verticale, y_S viene valutato, per convenzione, come valor medio delle ordinate dei due punti proiettati: $y_S = (y_{Sd} + y_{Ss}) / 2$ Nota 8.

Si noti che in questo caso la visione può essere disturbata e potrebbe essere difficoltoso posizionare esattamente il punto percepito.

3. La geometria di ripresa

3.1. Assi ottici paralleli

Questa configurazione, illustrata in figura 4a, è caratterizzata dal fatto che gli assi ottici delle telecamere sono paralleli. Per motivi di semplicità costruttiva e operativa si fa in modo che i sensori siano anche complanari.

La principale caratteristica per quanto riguarda la stereoscopia deriva direttamente dalla specifica configurazione geometrica.

Gli assi ottici, essendo rette parallele, "convergono all'infinito"; per questo motivo, i punti della scena ripresa posti "all'infinito" - in pratica ad una distanza relativamente grande dalle telecamere - formano sui due sensori immagini ubicate nelle stesse posizioni (relativamente alle coordinate locali dei sensori x,y).

In fase di visualizzazione, sullo schermo del display tali punti risultano coincidenti e quindi vengono percepiti "sullo schermo" (cioè alla stessa distanza dello schermo stesso).

In linea di massima questo effetto è da considerarsi un difetto perché limita allo spazio tra lo schermo e lo spettatore il volume in cui è possibile far percepire gli oggetti visualizzati Nota 9.

Peraltro, con una facile operazione di post-produzione, è possibile inserire una traslazione orizzontale per minimizzare tale problema e utilizzare anche lo spazio percepito "al di là" dello schermo Nota 10.

L'analisi del modello geometrico della configurazione di ripresa, utilizzando il modello delle camera oscura al posto delle telecamere, permette di definire le relazioni intercorrenti tra la posizione spaziale del generico punto oggetto, cioè dei punti costituenti la superficie degli oggetti ripresi, e le coordinate del punto immagine, cioè della sua proiezione sulla superficie dei sensori.

Le coordinate (x_d, y_d), (x_s, y_s) dei punti immagine proiettati sui sensori sono ricavate dalle seguenti

Nota 8 - Non esiste infatti alcun motivo fisico o fisiologico per giustificare questa posizione, che si propone solo per validare la relazione 5c) anche in caso di disparità verticale.
Nota 9 - Per la verità tale volume è ancora più ridotto: al massimo si estende fino a circa la metà della distanza spettatore-schermo al fine di evitare angoli di convergenza oculare di valore eccessivo.
Nota 10 - Per esempio, alcune fotografie di Marte riprese dalla sonda Mars Pathfinder della Nasa sono state elaborate in questo modo - http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/anaglyph-arc.html.

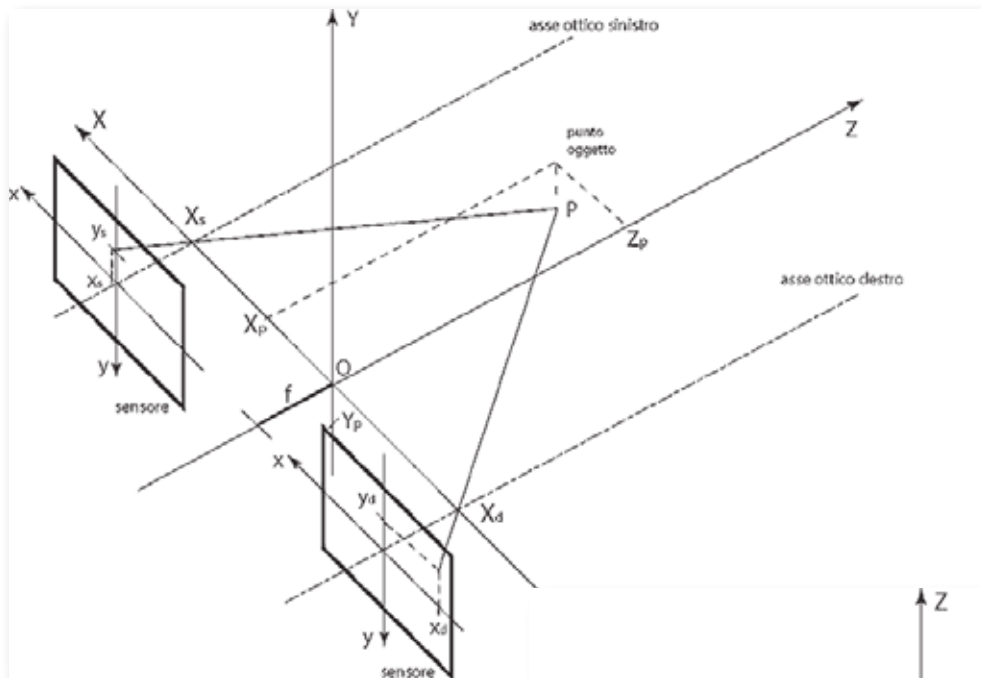



Fig. 4a – Configurazione ad assi ottici paralleli

Fig. 4b – Configurazione ad assi ottici paralleli - vista dall'alto

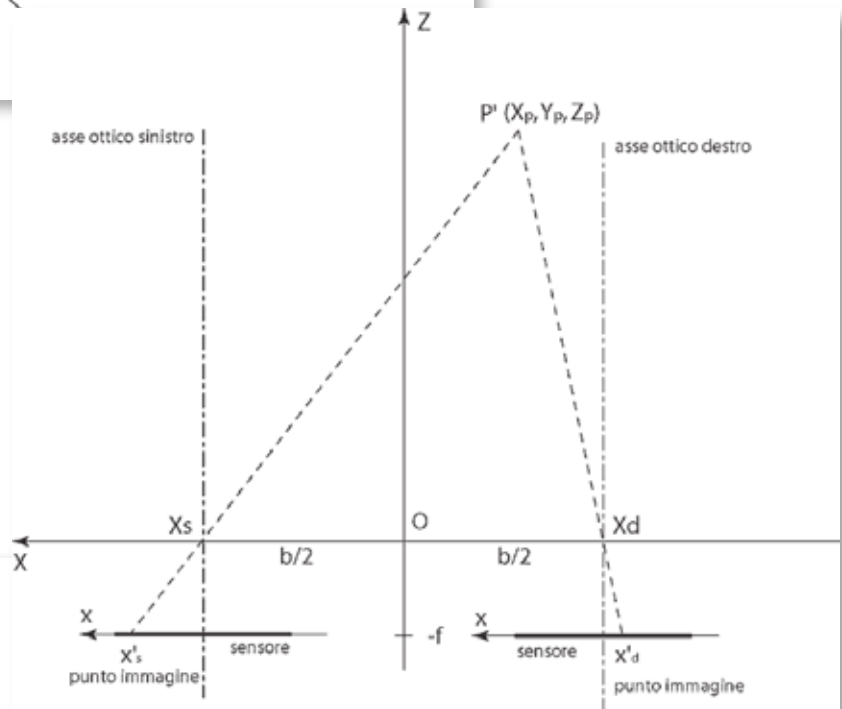
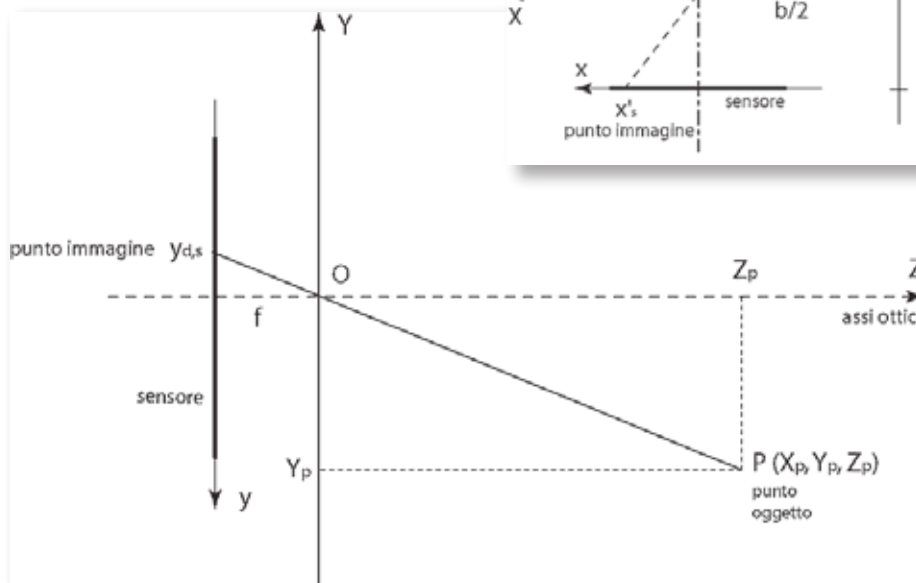



Fig. 4c – Configurazione ad assi ottici paralleli - vista di lato

relazioni, nota la posizione (X_p, Y_p, Z_p) del relativo punto oggetto:

6a) $$x_d = -\frac{f}{Z_p}\left(X_p + \frac{b}{2}\right)$$

6b) $$x_s = -\frac{f}{Z_p}\left(X_p - \frac{b}{2}\right)$$

7a) $$y_d = -\frac{f}{Z_p}Y_p$$

7b) $$y_s = -\frac{f}{Z_p}Y_p$$

Dove le grandezze usate sono state illustrate nel paragrafo precedente e sono riportate anche nelle figure 4a, 4b e 4c che illustrano la configurazione di ripresa ad assi ottici paralleli sotto diversi punti di vista.

Dalla figura 4c emerge che le proiezioni sui due sensori di ogni punto della scena presentano le stesse ordinate rispetto alle coordinate locali. Pertanto non si generano disparità verticali dovute alla conversione tra lo spazio reale e le immagini stereoscopiche proiettate sui sensori; questa caratteristica positiva è uno dei principali punti di forza di questa configurazione di ripresa.

In particolare, le disparità orizzontale e verticale, δ_o e δ_v, sono date dalle seguenti relazioni:

8a) $$\delta_o = x_d - x_s = -\frac{f}{Z_p}b$$

8b) $$\delta_v = y_d - y_s = 0$$

dalla cui analisi emergono due interessanti conseguenze:

- ◊ dalla relazione 8a) si evince che, data una lunghezza focale f e una base stereoscopica b, la disparità orizzontale δ_o dipende solamente dal valore della coordinata Z_p del punto oggetto, in prima approssimazione uguale alla distanza dell'oggetto dalle telecamere. La lunghezza focale f funge da fattore moltiplicativo in proporzione diretta con la disparità.
- ◊ Dalla relazione 8b) emerge che in questa configurazione di ripresa, nei limiti dei modelli usati, ed in particolare in assenza di distorsioni dovute alle ottiche, non si generano disparità verticali.

3.2. Assi ottici convergenti

Questa configurazione, illustrata in figura 5a, è caratterizzata dal fatto che gli assi ottici delle telecamere si intersecano in un punto (*punto di convergenza*), similmente agli assi ottici oculari, che convergono verso il punto di fissazione.

Per motivi di semplicità costruttiva e operativa si fa in modo che i sensori siano simmetrici rispetto al piano ZY; pertanto li si fa ruotare, in verso opposto, attorno al proprio asse verticale della stessa quantità, l'angolo di convergenza β [Nota 11].

Questo è definito come l'angolo compreso tra l'asse ottico e l'asse Z; è positivo se misurato in senso antiorario per la camera destra e in senso orario per la camera sinistra. Si assume che abbia sempre valore positivo o nullo (il questo caso gli assi ottici risultano paralleli).

Analogamente al caso precedente, l'analisi del modello geometrico della configurazione di ripresa, utilizzando il modello delle camera oscura al posto delle telecamere, permette di definire le relazioni intercorrenti tra la posizione spaziale

Nota 11 - Per la precisione, i sensori vengono fatti ruotare attorno ad un asse verticale passante per il centro ottico della camera.

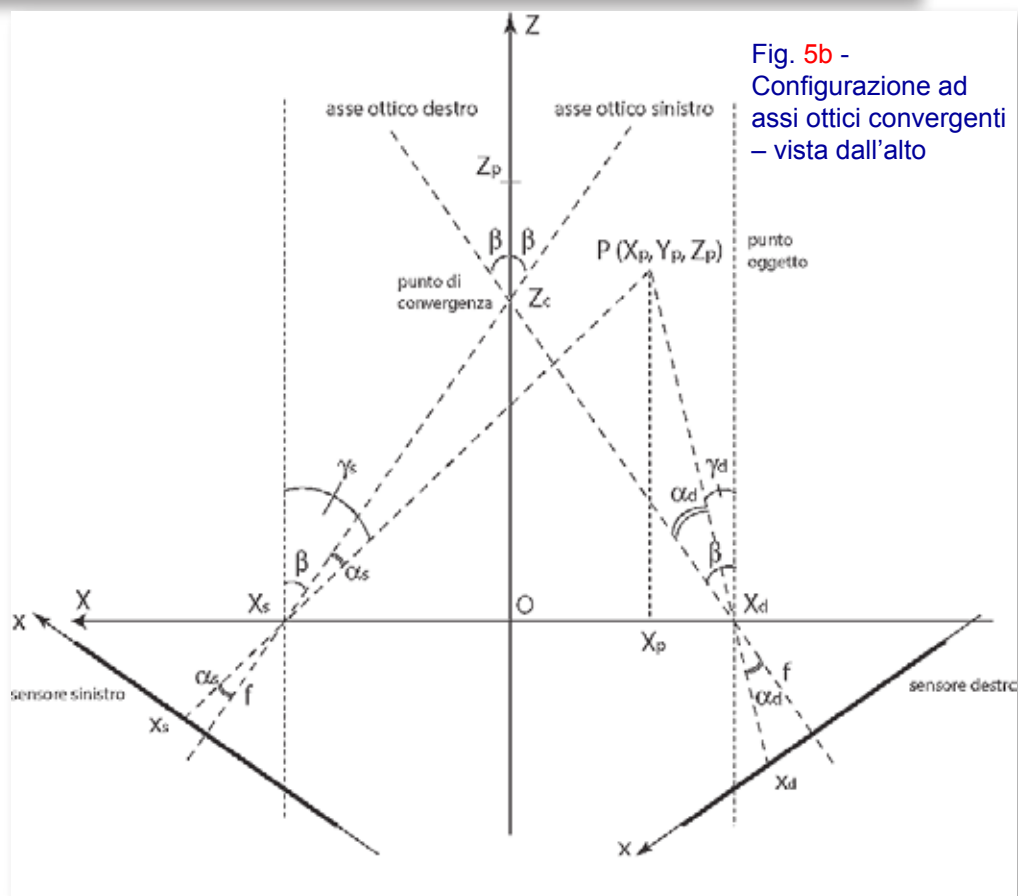
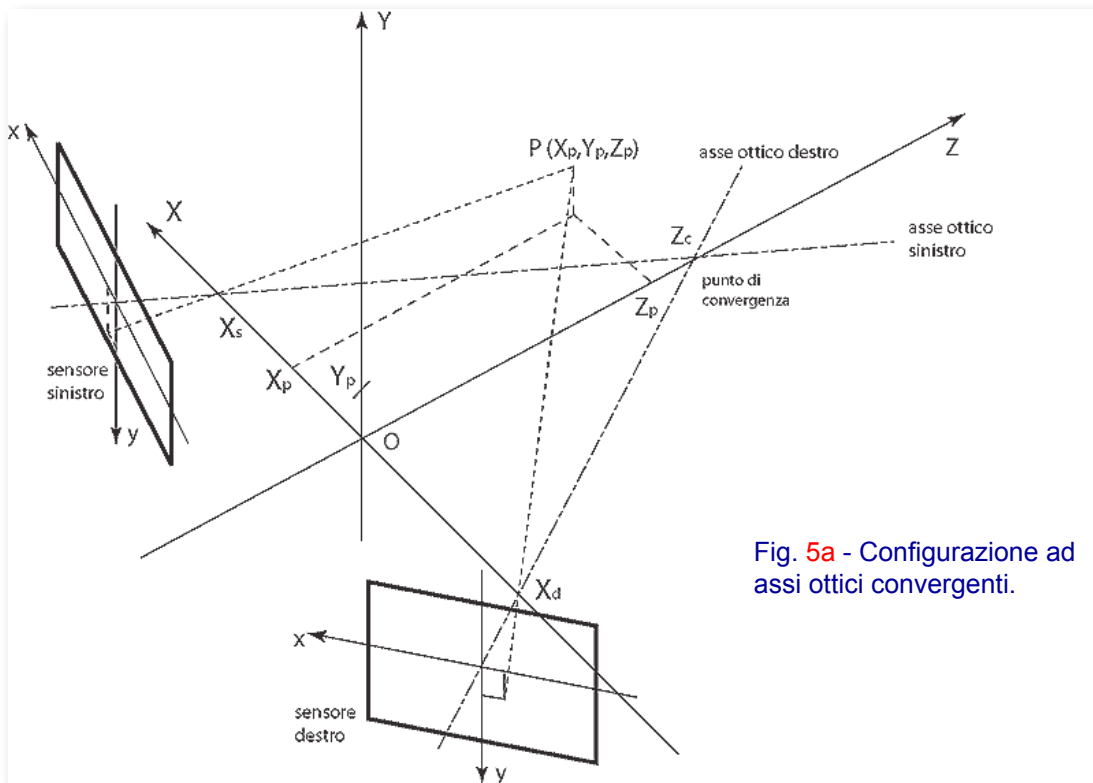



Fig. 5a - Configurazione ad assi ottici convergenti.

Fig. 5b - Configurazione ad assi ottici convergenti – vista dall'alto

del generico punto oggetto, cioè dei punti costituenti la superficie degli oggetti ripresi, e le coordinate del punto immagine, cioè della sua proiezione sulla superficie dei sensori.

Dall'analisi della figura 5b, che illustra la configurazione in oggetto vista dall'alto, si ricavano le relazioni 9a) e 9b) che danno le ascisse dei punti immagine rispetto al sistema di coordinate dei sensori[Nota 12]:

Nota 12 - Per la derivazione delle relazioni 9a e 9b conviene considerare gli angoli α, β e γ, rappresentandoli come arcotangente di un rapporto noto.

Nota 13 - Per la derivazione delle relazioni 10a) e 10b) conviene considerare i triangoli simili composti dalle ordinate y e Y_p e dalle proiezioni della linea di proiezione sul piano XZ.

9a)

$$x_d = -f * tg\left(arctg\left(\frac{X_p + b/2}{Z_p}\right) - \beta\right)$$

9b)

$$x_s = -f * tg\left(arctg\left(\frac{X_p - b/2}{Z_p}\right) + \beta\right)$$

Mentre per ricavare le relazioni 10a) e 10b), valide per le ordinate dei punti immagine, conviene analizzare la figura 5a[Nota 13].

10a)

$$y_d = \frac{fY_p}{Z_p} \frac{\cos\left(arctg\left(\frac{X_p + b/2}{Z_p}\right)\right)}{\cos\left(arctg\left(\frac{X_p + b/2}{Z_p}\right) - \beta\right)} = \frac{fY_p}{Z_p \cos\beta + \left(X_p + \frac{b}{2}\right)\sin\beta}$$

10b)

$$y_s = \frac{fY_p}{Z_p} \frac{\cos\left(arctg\left(\frac{X_p - b/2}{Z_p}\right)\right)}{\cos\left(arctg\left(\frac{X_p - b/2}{Z_p}\right) + \beta\right)} = \frac{fY_p}{Z_p \cos\beta - \left(X_p - \frac{b}{2}\right)\sin\beta}$$

Dove:

X_p, Y_p, Z_p sono le coordinate del punto oggetto considerato
f è la lunghezza focale delle camere
b è la base stereoscopica
β = arctg (b / $2Z_c$) è l'angolo di convergenza degli assi ottici

Si noti che ponendo $\beta = 0$, cioè annullando il valore dell'angolo di convergenza, in altre parole ponendo gli assi ottici paralleli, le relazioni 9a,b) e 10a,b) si riducono rispettivamente alle 6a,b) e 7a,b), ricavate nel punto precedente.

Le disparità orizzontale e verticale (sul sensore), δ_o e δ_v, sono date dalle seguenti relazioni:

11a) $$\delta_o = -f\left(tg\left[arctg\left(\frac{X_p + b/2}{Z_p}\right) - \beta\right] - tg\left[arctg\left(\frac{X_p - b/2}{Z_p}\right) + \beta\right]\right)$$

11b) $$\delta_v = \frac{-2fY_pX_p \sin\beta}{\left[Z_p \cos\beta + \left(X_p + \frac{b}{2}\right)\sin\beta\right]\left[Z_p \cos\beta - \left(X_p - \frac{b}{2}\right)\sin\beta\right]}$$

Dalla cui analisi emerge che:

◊ Se l'angolo di convergenza è nullo, $\beta = 0$, ovvero si è in configurazione ad assi ottici paralleli, si ottiene: $\delta_o = (-f\,b) / Z_p$ e $\delta_v = 0$, cioè le relazioni 8a) e 8b), come è lecito aspettarsi.

◊ La convergenza degli assi ottici delle camere implica l'ingenerarsi di una disparità verticale dovuta alla distorsione trapezoidale (in inglese: *key-stone distorsion*) che si verifica quando si inclina il sensore rispetto alla scena ripresa. Il suo valore è nullo:

- per ogni punto della scena ripresa giacente sul piano ZX (Y_p=0)
- per ogni punto della scena ripresa giacente sul piano ZY (X_p=0)
- per ogni punto posto "all'infinito" ($Z_p \rightarrow \infty$)

◊ • La disparità verticale risulta direttamente proporzionale alla lunghezza focale, f, e all'ordinata del punto, Y_p, e dipende in modo non banale dalla posizione del punto ripreso (coordinate X_p e Z_p), dalla base stereoscopica b e dall'angolo di convergenza degli assi ottici delle camere β.

3.3. Relazione tra lo spazio percepito e lo spazio della scena

Per comprendere a fondo il funzionamento della stereoscopia, ed in particolare per analizzarne le distorsioni tipiche, è necessario mettere in relazione lo spazio tridimensionale della scena ripresa (coordinate X_p, Y_p, Z_p) con lo spazio tridimensionale percepito dall'osservatore in fase di visualizzazione (coordinate X_o, Y_o, Z_o).

Questo si ottiene combinando le relazioni 9a,b), e 10a,b) che descrivono i rapporti tra lo spazio della scena con la sua proiezione sui sensori, con la relazione esistente tra le coordinate dello schermo con le coordinate sui sensori, 3a,b), e con le relazioni 5a,b,c) che legano le proiezioni dei punti con la posizione percepita dall'osservatore nello spazio virtuale generato dalla visione stereoscopica.

Si ottengono le seguenti relazioni, valide per la configurazione ad assi ottici convergenti; per ricavare le relazioni valide per la configurazione ad assi ottici paralleli è sufficiente porre $\beta = 0$:

12a) $$X_o = \frac{fM}{2} \frac{tg\left[arctg\left(\frac{2X_p + b}{2Z_p}\right) - \beta\right] + tg\left[arctg\left(\frac{2X_p - b}{2Z_p}\right) + \beta\right]}{1 + \frac{Mf}{e}\left\{tg\left[arctg\left(\frac{2X_p + b}{2Z_p}\right) - \beta\right] - tg\left[arctg\left(\frac{2X_p - b}{2Z_p}\right) + \beta\right]\right\}}$$

12b) $$Y_o = 2MfY_p \frac{\frac{2Z_p \cos\beta + b\sin\beta}{\left[2Z_p \cos\beta + (2X_p + b)\sin\beta\right]\left[2Z_p \cos\beta - (2X_p - b)\sin\beta\right]}}{1 + \frac{Mf}{e}\left\{tg\left[arctg\left(\frac{2X_p + b}{2Z_p}\right) - \beta\right] - tg\left[arctg\left(\frac{2X_p - b}{2Z_p}\right) + \beta\right]\right\}}$$

12c) $$Z_o = \frac{Z_{oS}}{1 + \frac{Mf}{e}\left\{tg\left[arctg\left(\frac{2X_p + b}{2Z_p}\right) - \beta\right] - tg\left[arctg\left(\frac{2X_p - b}{2Z_p}\right) + \beta\right]\right\}}$$

4. Conclusioni

La configurazione di ripresa ad assi ottici paralleli è interessante per via della semplicità costruttiva dell'apparato di ripresa e per la semplicità della formalizzazione delle sue proprietà geometriche.

Ha inoltre proprietà interessanti soprattutto per quanto riguarda l'eliminazione di alcune distorsioni, tema che verrà trattato in un prossimo articolo.

Presenta alcune limitazioni per quanto riguarda lo spazio percepito in fase di visualizzazione, che si possono superare con un adeguato – e semplice – intervento in fase di post produzione; in particolare, è necessario traslare orizzontal-mente le immagini costituenti la coppia stereoscopica.

Tuttavia, la configurazione ad assi ottici convergenti è quella che più si avvicina alla geometria della visione umana, e presenta interessanti proprietà, quale quella di far percepire l'elemento di interesse sullo schermo, con parte della scena visualizzata "al di qua" dello schermo e parte "al di là" di esso. Sfrutta quindi in modo nativo tutto lo spazio percepibile in fase di visualizzazione, senza richiedere operazioni di post processing.

Tuttavia è affetta da alcune distorsioni, inevitabili proprio perché derivanti dalla geometria stessa della configurazione di ripresa.

Tutti i pro e i contro delle diverse configurazioni di ripresa non sono facilmente valutabili sulla carta, soprattutto per quanto riguarda la tolleranza dell'osservatore rispetto alle eventuali distorsioni.

Per questo motivo, è prevista una campagna di sperimentazione in cui si effettueranno riprese con un sistema configurabile nelle due modalità, variandone i parametri caratteristici, al fine di individuare le modalità di ripresa ottimali nelle varie situazioni.

Bibliografia

1. G. Colace, M. Muratori – Televisione stereoscopica, le basi della tecnica stereoscopica – Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, Agosto 2004
2. M. Muratori – Tecniche per la visualizzazione stereoscopica - Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, Aprile 2007
3. M. Muratori – Le distorsioni in stereoscopia - Elettronica e Telecomunicazioni, di prossima pubblicazione

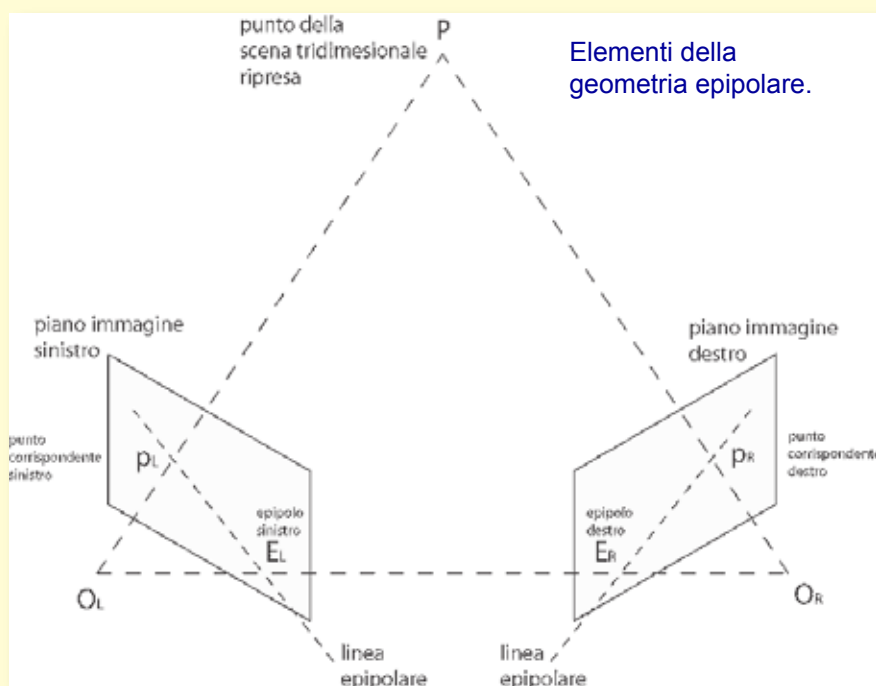
Elementi di geometria epipolare

La geometria epipolare analizza le configurazioni geometriche utilizzate nella stereoscopia.
In particolare individua le relazioni geometriche esistenti tra i punti della scena tridimensionale e le relative proiezioni sulle superfici bidimensionali dei sensori.

La figura illustra due camere ottiche rivolte verso il punto P (in altre parole: con gli assi ottici convergenti nel punto P).

In genere il piano dell'immagine si trova dietro al punto focale e l'immagine che vi si forma è rovesciata. Nell'ambito della geometria epipolare si preferisce semplificare il problema della proiezione considerando un *piano immagine virtuale* di fronte al punto focale al fine di ottenere un'immagine (virtuale) non rovesciata.

In figura, O_L e O_R rappresentano i punti focali delle due camere, rispettivamente sinistra e destra e P rappresenta il punto della scena reale di interesse.

Elementi della geometria epipolare.

Ogni camera cattura un'immagine bidimensionale a partire dal mondo tridimensionale. Questa conversione tra 3D e 2D è chiamata *proiezione prospettica* ed è possibile descriverla sfruttando il modello della camera ottica ideale.
E' usuale modellare tale proiezione tramite raggi che si dipartono dalla camera, passando attraverso il suo punto focale (il foro stenopeico). Ogni raggio corrisponde ad un unico punto immagine.

Punti corrispondenti

Le proiezioni del punto P sui piani immagine – cioè sulle superfici dei sensori – sono i punti p_L e p_R, rispettivamente sinistro e destro.Tali punti si chiamano *punti corrispondenti*.

Epipoli

I punti focali delle due camere sono distinti, perciò ognuno di essi è proiettato su un punto distinto sul piano immagine dell'altra camera.
Questi due punti immagine sono denotati in figura con E_L e E_R e sono chiamati *epipoli*.
Si noti che sia gli epipoli, E_L ed E_R, sia i punti focali O_L e O_R giacciono sulla stessa retta, a volte chiamata col termine inglese *baseline*.

Linea epipolare

La linea O_L-P è vista dalla camera di sinistra come un singolo punto, p_L, perché è allineata al punto focale della camera stessa, mentre la sua proiezione sulla superficie del sensore della camera di destra è il segmento E_R-p_R, chiamato *linea epipolare*.
Simmetricamente, la proiezione della linea O_R –P sul sensore di destra è un punto, p_R, e mentre la sua proiezione sul sensore di sinistra forma la linea epipolare E_L-p_L.
Qualunque sia il punto P della scena tridimensionale ripresa, esso è in associazione con linee epipolari che passano per l'epipolo giacente sul piano immagine.

Piano epipolare

I punti P, O_L e O_R definiscono un piano, chiamato *piano epipolare*.
Le intersezioni di tale piano con i piani immagine dei sensori corrispondono alle linee epipolari.

Vincoli epipolari e triangolazione

Se la posizione relativa e la rotazione di una camera rispetto all'altra sono noti, l'analisi della geometria epipolare corrispondente porta alle seguenti due osservazioni:

- ◊ Se il punto p_L, proiezione sul sensore sinistro del punto P, è noto, allora anche la linea p_L-O_L è nota e conseguentemente è nota (o, perlomeno, si può ricavare) anche la linea epipolare E_R-p_R, anche se il punto p_R è sconosciuto. Peraltro è noto che tale punto deve giacere sulla linea epipolare E_R-p_R. In altre parole, per ogni punto dell'immagine, il corrispondente punto sull'altra immagine deve giacere su una linea epipolare nota (o che si può ricavare). Ciò fornisce un vincolo epipolare che i punti corrispondenti devono soddisfare e implica anche che è possibile verificare se tali punti corrispondono ad uno stesso punto P della scena tridimensionale. I vincoli epipolari sono descritti dalla *matrice essenziale*[Nota a] oppure dalla *matrice fondamentale*[Nota b] legate alla coppia di camere. L'individuazione del punto corrispondente a partire da un punto immagine dato è il fine del *problema della corrispondenza* (in inglese: *corrispondence problem*).

- ◊ Se i punti pL e pR sono noti, le loro linee di proiezione sono pure note. Se i due punti immagine corrispondono realmente allo stesso punto P della scena tridimensionale, le linee di proiezione devono intersecarsi proprio in P. Ciò significa che la posizione di P può essere calcolata a partire dalle coordinate dei due punti immagine p_L e p_R con un processo chiamato triangolazione.

Semplificazioni

La geometria epipolare risulta semplificata se i due piani immagine sono complanari.
In questo caso, le linee epipolari coincidono e sono parallele alla retta che contiene i due punti focali O_L e O_R. Inoltre possono, in pratica, essere allineate all'asse delle ascisse (di solito orizzontale) delle immagini.

Nota a - E' una matrice di dimensione 3x3 che, assieme ad alcune proprietà addizionali, mette in relazione punti corrispondenti in immagini stereoscopiche, assumendo che siano state riprese da camere ottiche (pinhole camera). Vedi anche: http://en.wikipedia.org/wiki/Essential_matrix
Nota b - E' una matrice di dimensione 3x3 che mette in relazione punti corrispondenti in immagini stereoscopiche. E' più generica della matrice essenziale (essential matrix). Vedi anche: en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_matrix_(computer_vision)

Ciò implica che per ogni punto di un'immagine, il suo punto corrispondente sull'altra immagine può essere trovato cercando solo lungo una retta orizzontale (parallela alle ascisse nel sistema di coordinate definito sui sensori, ossia sulle coordinate immagine).

Se le camere non possono essere disposte in questo modo, le coordinate immagine delle camere possono essere trasformate per emulare un piano comune tramite il processo chiamato rettificazione dell'immagine (in inglese: *image rectification*).

Matrice fondamentale

La matrice fondamentale (fundamental matrix, chiamata anche bifocal tensor), F, nell'ambito della computer vision è una matrice di dimesioni 3x3 e rango 2 che mette in relazione i punti corrispondenti di una coppia di immagini stereoscopiche.

Nell'ambito della geometria epipolare, assieme alle coordinate immagine y_1 e y_2 di due punti corrispondenti di una coppia di immagini stereoscopiche, descrive la linea epipolare, data da $F\ y_1$, su cui deve giacere il punto corrispondente y_2.

Quindi per tutte le coppie di punti corrispondenti, si verifica la relazione seguente:

3) $$y_2^T F y_1 = 0$$

La matrice fondamentale può essere stimata dando almeno sette corrispondenze tra coppie di punti corrispondenti. I suoi sette parametri rappresentano l'unica informazione geometrica relativa alle camere che può essere ottenuta utilizzando solo punti corrispondenti.

La relazione sopra riportata, che definisce la matrice fondamentale, fu pubblicata nel 1992 da Faugeras e Hartley. Sebbene la matrice essenziale di Longuet-Higgins soddisfi una relazione simile, la matrice fondamentale descrive la corrispondenza in termini di geometria proiettiva più generali e fondamentali.

L'esistenza della matrice fondamentale implica che sia possibile verificare se una coppia di punti estratti da una coppia di immagini stereoscopiche corrispondono allo stesso punto della scena reale, risolvendo il problema di corrispondenza.

Tuttavia la relazione sopra riportata pone una condizione necessaria ma non sufficiente. Pertanto con essa si può verificare la non esistenza di un'ipotetica corrispondenza, ma non si può accertane definitivamente l'esistenza.

Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica all'IBC 2007

Ad Amsterdam (6-11 settembre) si è tenuta la 40ª edizione dell'IBC (*International Broadcasting Convention*) che annualmente presenta le innovazioni in campo tecnologico per la radiodiffusione e il multimedia. Circa 47000 visitatori da più di 120 paesi hanno visitato la mosta a cui hanno contributito più di 1300 aziende.

il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologiche della Rai era anche quest'anno presente presso l'EBU Village (stand 10.411) con due tecniche innovative:

- ◊ accesso veloce ai programmi DVB-SH (il nuovo standard per la diffusione ibrida, terrestre e via satellite, di servizi rivolti ai ricevitori mobili)
- ◊ CD3, una tecnica che può consentire un aumento della capacità disponibile per i servizi DVB-T2 (il futuro standard per la televisione digitale terrestre)

Il Centro ha contribuito inoltre alla conferenza:

- Gino Alberico - Sessione Wired and wireless technologies (Giovedì 6 Settembre 10:00 -13:00)
- Alberto Morello - Sessione Multimedia delivery (Venerdì 7 Settembre, 14:30-16:30)
- Massimo Visca - Sessione HD production standards and studio issues (Domenica 09 Settembre, 11:30 - 13:00)

Ulteriori informazioni sull'IBC sono reperibili sul sito www.org.ibc e le sessioni della Conferenza, comprese quelle precedentemente indicate, sono disponibili in www.ibcsessions.com.